

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID



DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

PROYECTO FIN DE CARRERA

**Diseño de un sistema de clasificación  
para detección de fallos en ejes de  
ferrocarril mediante la energía WPT**

**TITULACIÓN: INGENIERO INDUSTRIAL**

Octubre 2013

AUTOR: VÍCTOR GIL PAYÁN

TUTORA: MARÍA JESÚS GÓMEZ GARCÍA

DIRECTORA: CRISTINA CASTEJÓN SISAMÓN



**Título:** Diseño de un sistema de clasificación para detección de fallos en ejes de ferrocarril mediante la energía WPT.

**Autor:** Víctor Gil Payán

**Directores:** María Jesús Gómez García  
Cristina Castejón Sisamón

### EL TRIBUNAL

**Presidente:** \_\_\_\_\_

**Vocal:** \_\_\_\_\_

**Secretario:** \_\_\_\_\_

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día \_\_ de \_\_\_\_\_ de 20\_\_ en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la **CALIFICACIÓN** de

**VOCAL**

**SECRETARIO**

**PRESIDENTE**



## AGRADECIMIENTOS

A todos aquellos que han hecho posible este proyecto, en especial a María Jesús por su ayuda y dedicación.

A todos los compañeros que me han acompañado durante estos años de universidad.

A mi familia.

A mis amigos.

A mi novia, por su apoyo en los momentos finales del proyecto.

Y a todas esas personas que queriendo o sin querer han contribuido a que llegara hasta aquí.

A todos, gracias.



## RESUMEN

El presente proyecto pretende diseñar un sistema de clasificación de defectos en ejes de ferrocarril a partir de las energías de la Transformada Wavelet Packet de las señales de vibración de un eje ferroviario a escala 1/8 con diferentes defectos.

Para ello, estudios y trabajos previos del Departamento de Mecánica de la Universidad Carlos III de Madrid muestran el nivel de descomposición de WPT y los paquetes de energía más adecuados para este propósito.

El diseño del sistema de clasificación se intentará llevar a cabo con redes neuronales ya que trabajos previos han demostrado su éxito, y posteriormente, mediante el método Señal de Respuesta.

Todo esto dará como resultado curvas de probabilidad de detección (POD) para la clasificación de defectos.





## ABSTRACT

The goal of this project is the design of a classification system of defects of railway shafts by means of the energy of the Wavelet Packet Transform of the vibration signals of a 1/8 shaft with different crack sizes.

For this purpose, some previous studies and projects of the Departement of Mechanics from Universidad Carlos III de Madrid show the most suitable level of decomposition and energy packets to use.

The design of the classification system will be carried out using neural nets due to previous studies show their success, and finally, by means of the Signal Response Method.

All of this gives as a result probability of detection (POD) curves for the defect classification.



# INDICE

AGRADECIMIENTOS .....	5
RESUMEN .....	7
ABSTRACT.....	9
INDICE .....	11
INDICE DE TABLAS .....	14
INDICE DE FIGURAS .....	15
1. INTRODUCCION Y OBJETIVO.....	17
1.1. MARCO TEÓRICO .....	17
1.2. MOTIVACIÓN .....	19
1.3. OBJETIVO.....	21
2. PRINCIPALES MÉTODOS DE ANÁLISIS DE SEÑALES DE VIBRACIÓN EN EL DOMINIO DEL TIEMPO Y LA FRECUENCIA.....	22
2.1. INTRODUCCIÓN .....	22
2.2. LA TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER .....	23

---

2.3.	LA SHORT TIME FOURIER TRANSFORM. ....	25
2.4.	LA TRANSFORMADA WAVELET .....	25
2.4.1	LA WAVELET DAUBECHIES. ....	26
2.5.	LA TRANSFORMADA DISCRETA WAVELET .....	28
2.6.	LA TRANSFORMADA WAVELET PACKET .....	29
2.7.	EL PROBLEMA DE LA SIMETRÍA.....	30
3.	ADQUISICIÓN DE DATOS Y POSTPROCESADO DE LOS MISMOS .....	34
3.1.	SISTEMA EXPERIMENTAL.....	34
3.1.1.	BANCO DE ENSAYOS .....	35
3.1.2.	EJE.....	38
3.1.3.	ACELERÓMETRO .....	39
3.1.4.	SISTEMA DE ACONDICIONAMIENTO DE LAS SEÑALES .....	41
3.1.5.	SOFTWARE DE ADQUISICIÓN Y TRATAMIENTO DE LOS DATOS .....	41
3.1.6.	TOMA DE MEDIDAS .....	42
3.2.	TRATAMIENTO, PROCESADO Y ANÁLISIS DE LOS DATOS.....	45
3.2.1.	CÁLCULO DE LA DESCOMPOSICIÓN DE LA SEÑAL Y SU ENERGÍA.....	46
4.	SISTEMAS DE CLASIFICACIÓN .....	49
4.1.1.	FUNDAMENTOS.....	50
4.1.2.	ARQUITECTURA .....	52
4.1.3.	APLICACIÓN EN ESTE PROYECTO. ....	54
4.2.	MÉTODO DE SEÑAL DE RESPUESTA OR “SIGNAL RESPONSE”.....	55
4.2.1.	CURVAS POD PARA DATOS DE SEÑAL DE RESPUESTA O “SIGNAL RESPONSE DATA”. 57	
5.	RESULTADOS .....	61
5.1.	RESULTADOS DE LA RED NEURONAL .....	61
5.2.	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DE LAS REDES NEURONALES.....	64
5.3.	RESULTADOS DEL METODO “SIGNAL RESPONSE” O SEÑAL DE RESPUESTA .....	64
5.4.	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DEL METODO SEÑAL DE RESPUESTA O “SIGNAL RESPONSE”.....	72
6.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....	75
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	77
	ANEXOS.....	81
	ANEXO A DIMENSIONES DEL EJE.....	82

---

ANEXO B	TERMINOLOGÍA ESTADÍSTICA Y CÁLCULO DE PARÁMETROS ESTADÍSTICOS .....	84
	INTERVALO DE CONFIANZA. ....	84
	MODELO LOG – NORMAL.....	85
	FUNCIÓN DENSIDAD DE PROBABILIDAD. CASO CONTINUO. ....	86
ANEXO C	TABLAS CON LOS PAQUETES DE LAS ENERGÍAS.....	88
	20Hz Paquete 14. ....	88
	20Hz Paquete 16. ....	89
	40Hz Paquete 27. ....	90
	40Hz Paquete 31. ....	91
	60Hz Paquete 17. ....	92
	60Hz Paquete 18. ....	93

## INDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Parámetros de trabajo del acondicionador Nexus 2693 .....	41
Tabla 3.2 Paquete energía relevantes por cada frecuencia. ....	45
Tabla 3.3 Estructura de un fichero de datos.....	46
Tabla 4.1 Tabla con las características de la red neuronal utilizada. ....	55
Tabla 5.1 Tabla con los valores umbrales de detección ath. ....	65
Tabla 5.2 Tabla con los resultados para 20Hz, paquete 14. ....	66
Tabla 5.3 Tabla con los resultados para 20Hz, paquete 16. ....	66
Tabla 5.4 Tabla con los resultados para 40Hz, paquete 27. ....	67
Tabla 5.5 Tabla con los resultados para 40Hz, paquete 31. ....	67
Tabla 5.6 Tabla con los resultados para 60Hz, paquete 17. ....	68
Tabla 5.7 Tabla con los resultados para 60Hz, paquete 18. ....	68

## INDICE DE FIGURAS

Ilustración 2.1 Wavelet Haar o Daubechies [12] .....	26
Ilustración 2.2 Representación Daubechies 2, 3, 4, 5 y 6 [12] .....	27
Ilustración 2.3 Estructura de una descomposición Wavelet [3] .....	29
Ilustración 2.4 Estructura de una descomposición Wavelet Packet [4] .....	30
Ilustración 2.5 Ejemplo descomposición de una señal [14] .....	31
Ilustración 2.6 Orden natural de las frecuencias de la señal [14] .....	32
Ilustración 3.1 Banco de ensayos [6] .....	36
Ilustración 3.2 Posición del acelerómetro [6] .....	40
Ilustración 3.3 Características del acelerómetro [7] .....	40
Ilustración 3.4 Representación señal a 20hz con defecto nivel 3. ....	47
Ilustración 4.1 Esquema de funcionamiento de una neurona [19] .....	51
Ilustración 4.2 Red neuronal monocapa [20] .....	53
Ilustración 4.3 Red neuronal recurrente [20] .....	53
Ilustración 4.4 Red neuronal radial [20] .....	54

---

Ilustración 4.5 Representación de la función de densidad de probabilidad [22].	58
Ilustración 4.6 Representación ideal del POD vs real [22].	58
Ilustración 4.7 Representación real de tres curvas POD.	59
Ilustración 5.1 Tasa de éxito durante el entrenamiento frente propagación	62
Ilustración 5.2 Número de neuronas frente propagación	62
Ilustración 5.3 POD para redes neuronales.	63
Ilustración 5.4 POD para 20Hz paquete 14	69
Ilustración 5.5 POD para 20Hz paquete 16	69
Ilustración 5.6 POD para 40Hz paquete 27	70
Ilustración 5.7 POD para 40Hz paquete 31	70
Ilustración 5.8 POD para 60Hz paquete 17	71
Ilustración 5.9 POD para 60Hz paquete 18	71
Ilustración 0.1 Niveles de confianza para curvas POD	84



# 1.INTRODUCCION Y OBJETIVO

## 1.1. MARCO TEÓRICO

Las vibraciones son consecuencia de la no-idealidad de las máquinas que transmiten fuerzas, ya que estas poseen defectos. Debido a la transmisión de fuerzas por la máquina se produce su deterioro, lo que hace que las vibraciones aumenten más, y se acelera su rotura.

Actualmente hay diferentes técnicas que tratan de minimizar los tiempos no productivos de la maquinaria, ya sea por avería o por reparación, basándose en la premisa de que un aumento en la disipación de energía, independientemente de la forma

en la cual se presente, es debido a un mayor deterioro o desgaste de los elementos de la máquina. Una de las técnicas más utilizadas es el análisis de las vibraciones.

Evolutivamente, se pueden considerar varios métodos de mantenimiento que se utilizan en función del tipo de máquina y de su importancia:

- *Mantenimiento correctivo:*

Es aquel que se ocupa de la reparación una vez se ha producido el fallo o el paro súbito de la máquina o instalación. El caso ideal consiste en rebajar el mantenimiento correctivo hasta el nivel óptimo de rentabilidad para la empresa ya que no se puede eliminar en su totalidad.

- *Mantenimiento preventivo:*

Este tipo de mantenimiento surge de la necesidad de rebajar el correctivo y todo lo que representa. Pretende reducir la reparación mediante una rutina de inspecciones periódicas y la renovación de los elementos averiados, apoyándose en el conocimiento de la máquina, en base a la experiencia y los históricos obtenidos de las mismas.

- *Mantenimiento predictivo:*

Se basa en predecir la avería antes de que esta se produzca. Se trata de conseguir adelantarse a la avería o al momento en que el equipo o elemento deja de trabajar en sus condiciones óptimas. Para conseguir esto, se utilizan herramientas y técnicas de monitorización de parámetros físicos. En el caso que nos ocupa serán las vibraciones.

Por lo general los pasos a seguir cuando se trabaja con vibraciones es:

- En primer lugar, se debe de establecer un nivel de vibración normal o básico, a partir del cual analizar la evolución de la vibración.
- En segundo lugar, se debe de establecer cuál es el nivel de vibración umbral que, una vez superado aconseje realizar una reparación.

- *Mantenimiento integrado o productivo (TPM):*

Es un sistema de organización donde la responsabilidad de mantener las instalaciones o máquinas no recae solo en el departamento de mantenimiento, sino en toda la estructura de la empresa [10].

## 1.2. MOTIVACIÓN

A lo largo del tiempo el estudio de las vibraciones y sus efectos en los diversos elementos de los sistemas mecánicos se ha ido incrementando. Uno de los elementos más estudiados son los rodamientos. Las vibraciones en los rodamientos han sido estudiadas mediante multitud de análisis diferentes como puede ser la Transformada de Fourier, Wavelet y la Wavelet Packets entre otros. Trabajos como los que se mencionan a continuación contribuyen a la detección de fallos en los rodamientos y por lo tanto a su mantenimiento:

- Análisis de señales mediante STFT y Wavelet. Aplicación a defectología en rodamientos. PFC: Miguel Zamorano Castaño.
- Aplicación del método shock pulse para detección de defectos en rodamientos. PFC: Jaime González Rodríguez.
- Procesamiento digital de señales vibratorias mediante la Transformada Wavelet Packets. PFC: Eduardo Romero Mariscal.

El estudio de las vibraciones en rodamientos y la detección de fallos en estos es algo que no está resuelto aún y en lo que se sigue trabajando para mejorar los sistemas de monitorización.

De la misma manera que los rodamientos se diseñan con el fin de que sea el primer elemento que falle por su bajo coste de reparación, mantenimiento y sustitución, y esto hacía interesante su estudio; hay otros elementos mecánicos que no interesan que

fallen por todo lo contrario, además de las consecuencias catastróficas que podrían llegar a tener.

Uno de estos elementos que interesa saber cuándo va a fallar son los ejes, más concretamente en este trabajo los de ferrocarril. Sobre la detección de fallos en ejes actualmente se está investigando, de la misma manera que se hizo para rodamientos. Este proyecto se encuadra dentro de este marco de investigación.

La justificación del estudio de los fallos y la detección de estos en ejes es similar a la de los rodamientos. En un eje de ferrocarril un fallo inesperado supone, no solo un alto coste de sustitución, reparación de los daños que cause su rotura, sino también unas consecuencias catastróficas ya que puede provocar un accidente, con los peligros que esto conlleva para la circulación del mismo, las personas y materiales que en él se transporten.

Por esto es importante saber cuando en un eje está empezando a fallar, el tipo de fallo y la vida útil que le queda en condiciones de seguridad; así como cuál debería ser el mantenimiento más apropiado para cada situación.

Actualmente, los ejes de ferrocarril se inspeccionan mediante técnicas de inspección no destructiva (NDT, *Non Destructive Testing*). Estas técnicas se engloban en el marco de un mantenimiento preventivo que requiere parar la máquina y desmontarla con los costes que este conlleva. Este proyecto se engloba dentro de un marco de investigación más amplio mediante el cual pretende establecer un método de mantenimiento predictivo basado en la monitorización de estado, en el que se pudieran detectar los defectos durante el funcionamiento normal de la máquina sin necesidad de pararla ni desmontarla.

### 1.3. OBJETIVO

Dentro del marco global en el que se encuentra este proyecto, que es el desarrollo de una técnica que permita el mantenimiento en línea de ejes de ferrocarril durante el funcionamiento normal basado en vibraciones, el objetivo particular de este proyecto es el diseño de un sistema de clasificación que permita discriminar si el eje está sano o tiene algún defecto a partir de las vibraciones.

Para llevar a cabo este objetivo principal, en este proyecto se realizarán los siguientes pasos:

- Adquisición de señales vibratorias de un eje ferroviario a escala 1/8 a tres velocidades diferentes de giro, y con diferentes defectos inducidos en su geometría.

- Cálculo de la energía mediante la transformada Wavelet Packets (WPT, *Wavelet Packets Transform*) utilizando el nivel de descomposición 9 para determinadas bandas de frecuencia. Tanto la herramienta utilizada (WPT), como el nivel de descomposición y las bandas de frecuencia seleccionadas vienen determinadas por estudios previos realizados sobre señales de otros ejes.

- Una vez descompuestas las señales tras el cálculo de las energías de la señal se estudiará si es posible diseñar un sistema de clasificación que genere unas curvas de probabilidad de detección (POD) que muestren una buena fiabilidad de estos parámetros. Para ello se probarán diferentes sistemas de clasificación:

- Redes neuronales.

- Método de señal de respuesta (*Signal Response*)

## **2.PRINCIPALES MÉTODOS DE ANÁLISIS DE SEÑALES DE VIBRACIÓN EN EL DOMINIO DEL TIEMPO Y LA FRECUENCIA**

### **2.1. INTRODUCCIÓN**

A la hora de estudiar señales de vibración interesa tanto el dominio de la frecuencia y como el tiempo. Respecto a la frecuencia, es bastante importante conocer los modos de vibración. Para ello se utiliza la Transformada de Fourier, que convierte una señal en el dominio del tiempo en una señal en el dominio de la frecuencia [1].

Uno de los problemas que presenta la Transformada de Fourier es que pide que la función sea periódica, lo cual reduce bastante los campos de aplicación. Para poder utilizar la transformada a señales no periódicas, que son las más habituales, se tratan estas como las señales periódicas de periodo infinito. Otra manera de solucionar este problema es dividir la señal en partes que se pueden asumir más o menos estacionarias, y esto se hace mediante la Transformada Rápida de Fourier [1].

## 2.2. LA TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER

La Transformada de Rápida de Fourier toma como base la Transformada de Fourier. La Transformada de Fourier expresa una señal  $x(t)$ , de periodo  $T$ , como suma de sus armónicos, tal y como se muestra a continuación de la manera en que se muestra a continuación [Ecuación 1]:

$$x(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \left( a_k \cdot \cos \frac{2\pi kt}{T} + b_k \cdot \sen \frac{2\pi kt}{T} \right) \quad \text{Ecuación 1}$$

Siendo los coeficientes:

$$a_0 = \frac{1}{T} \cdot \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cdot dt$$

$$a_{k \geq 1} = \frac{2}{T} \cdot \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cdot \cos \left( \frac{2\pi kt}{T} \right) \cdot dt$$

$$b_{k \geq 1} = \frac{2}{T} \cdot \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cdot \sen \left( \frac{2\pi kt}{T} \right) \cdot dt$$

Pero la Transformada de Fourier también se puede escribir de forma compleja [Ecuación 2] donde se puede ver mejor que este tipo de análisis se basa en el dominio de la frecuencia. Siendo  $X(f)$  la transformada de Fourier de  $x(t)$  [1].

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{-i2\pi ft} \cdot dt \quad \text{Ecuación 2}$$

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) \cdot e^{i2\pi ft} \cdot df \quad \text{Ecuación 3}$$

Es importante decir que esta expresión es válida para señales continuas en el tiempo, esto es, de  $-\infty$  a  $+\infty$ .

Como en la práctica no se puede conseguir una señal experimental continua sino que la señal experimental se muestrea, la Ecuación 5 no es válida. Por ello se definió la Transformada Discreta de Fourier (“Discrete Fourier Transform” DFT) que se define en la Ecuación 3:

$$X_k = \frac{1}{N} \sum_{r=0}^{N-1} x_r \cdot e^{-i2\pi kr/N}; \quad k=0,1,2,\dots,(N-1) \quad \text{Ecuación 4}$$

Esta ecuación supone realizar un gran número de operaciones ya que para N muestras es necesario llevar a cabo  $N^2$  multiplicaciones. Para dar solución a este inconveniente surge la FFT que obtiene los mismos resultados que la DFT pero solo con  $N \cdot \log_2 N$  multiplicaciones complejas con las ventajas que ello conlleva [2].

Esto se debe a que la serie completa “xr” la subdivide en sucesiones más cortas, por lo que no se calcula la DTF original completa sino otras más cortas, y al final se combinan para obtener la serie original.

Todo lo comentado hasta ahora es válido para señales estacionarias, pero ¿qué ocurre con las señales no estacionarias?



### 2.3. LA SHORT TIME FOURIER TRANSFORM.

Esta transformada permite el análisis de señales no estacionarias. Y para ello lo que hace es dividir la señal en diferentes partes donde se puede asumir que la señal es estacionaria. Una vez hecho esto la señal se multiplica por una función ventana cuya anchura debe ser igual a la parte de la señal que puede ser considerada como estacionaria [1].

El hecho de poder obtener el espectro de frecuencias en el instante en que ocurre en una ventaja pero que está limitada por el Principio de Incertidumbre de Heisenberg, el cual establece que es imposible saber con exactitud la frecuencia y el instante de tiempo en el que ocurre la señal. Por esta razón el estudio de la Transformada Wavelet es muy interesante como se va a ver a continuación.

### 2.4. LA TRANSFORMADA WAVELET

Las Wavelets son familias de funciones que se encuentran definidas en el espacio y se emplean como funciones de análisis, examinando la señal de interés en el plano tiempo-frecuencia para obtener sus características periódicas y no periódicas. Cada uno de los componentes de la familia se genera a partir de la Wavelet Madre  $\psi(t)$ , a través de las variables de escala ( $a$ ), que permite hacer dilataciones y contracciones de la señal, y la traslación ( $b$ ), que se encarga de mover la señal en el tiempo. Algunas de las principales familias de Wavelets son Daubechies, Biortogonales, Coiflets, Symlets, Morlet, Sombrero Mexicano (Mexican Hat) y Meyer. Todas ellas tienen una ecuación específica que las representa. Las Wavelets de cada familia se diferencian por un número que indica la cantidad de momentos de desvanecimiento [12].

Para poder explicar mejor los tipos de Wavelets se va a describir un nuevo concepto denominado “momentos de desvanecimiento”. Este concepto es importante,

ya que permite conocer la forma de la Wavelet y es un parámetro para saber cómo de útil es una wavelet para suprimir un polinomio dado. La suavidad de la wavelet viene determinada por el número de momentos de desvanecimiento que tenga [12].

El orden de una transformada Wavelet viene, normalmente, dado por el número de momentos de desvanecimiento que existan. Una forma de ver este concepto es pensar en que la palabra momento se refiere a un promedio, así que cuando el valor promedio de una wavelet es cero, se tiene un momento de desvanecimiento, y los polinomios de grado inferior serán eliminados[12].

Cabe mencionar que también estas funciones permiten reconstruir la señal original a través de la Transformada Wavelet inversa y que la Transformada Wavelet no es solamente local en tiempo, sino también en frecuencia [12].

#### 2.4.1 LA WAVELET DAUBECHIES.

La Wavelet Daubechies es un tipo de familia de Wavelet la cual se va a utilizar en este análisis, más concretamente la Daubechies 6. Dentro de las Daubechies hay que descartar las Daubechies 1 o Haar, ya que es un caso especial.

- Wavelet Haar

La Wavelet de Haar es también el Wavelet más simple posible; es una Daubechies, con un solo momento de desvanecimiento.

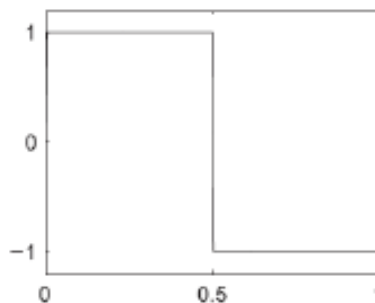


Ilustración 2.1 Wavelet Haar o Daubechies [12]

Como propiedades importantes de la función Haar es que cumple los requisitos de ortogonalidad y biortogonalidad, se puede comprimir, es simétrica, pero no regular; y admite soporte compacto. La Haar es válida tanto para la representación de una señal mediante transformada wavelet discreta (DWT) como la transformada wavelet continua (CWT). La desventaja técnica del wavelet de Haar es que no es continuo y por lo tanto no derivable. Esta propiedad, de cualquier forma, es una ventaja para el análisis de señales con transiciones repentinas, tales como el monitoreo del fallo de una herramienta en una máquina, es decir detectar discontinuidades y puntos de ruptura. Es una función muy sencilla que se utiliza para el análisis de señales usando transformadas discretas y continuas [12].

- Daubechies N

Estas funciones no poseen una única expresión explícita que las defina, la mayoría de las wavelet se agrupan en familias con características comunes, y en este caso la Daubechie el orden N indica la cantidad de momentos de desvanecimiento que posee cada una [12]. Por ejemplo en este caso nos interesa la función conocida como “db6”, esto representaría a la familia de las Daubechies que tiene 6 momentos de desvanecimiento.

La mayoría no son simétricas. Todas estas funciones presentan la característica que la regularidad va aumentando con el orden y que se pueden utilizar para calcular transformadas continuas y discretas con ellas [12].

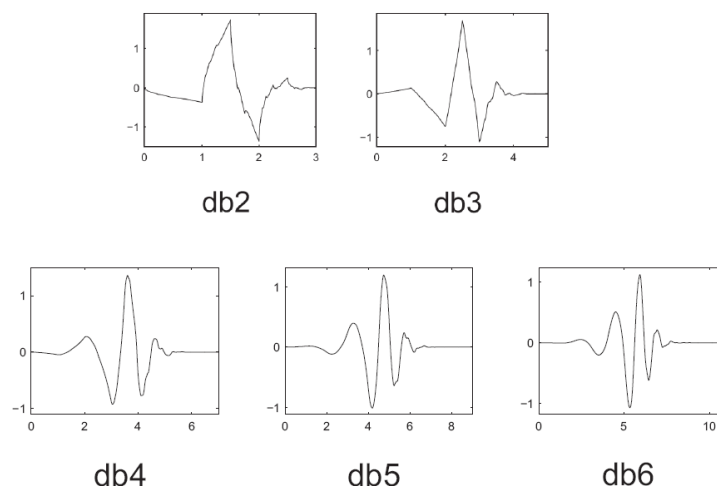


Ilustración 2.2 Representación Daubechies 2, 3, 4, 5 y 6 [12]

## 2.5. LA TRANSFORMADA DISCRETA WAVELET

Aunque el problema de resolución tiempo-frecuencia está presente en cualquier transformada sea cual sea, sin embargo con la utilización de la transformada Wavelet se soluciona en parte dicho problema. La idea fundamental de dicha transformada es el estudio de señales a diferentes escalas y resoluciones; y está diseñada para darnos una muy buena resolución temporal y pobre resolución frecuencial para altas frecuencias, y viceversa, es decir, buena resolución frecuencial y pobre temporal para bajas frecuencias. Por esta definición podremos decir con antelación que la transformada Wavelet es un estudio muy valioso para aquellas señales que posean componentes a baja frecuencia en todo su espectro y componentes de alta frecuencia pero de muy corta duración en un instante dado; cosa que ocurre en las mayoría de las señales vibracionales, de ahí su gran importancia en el estudio del diagnóstico de señales y su posterior mantenimiento predictivo de la máquina.

En el caso de la Transformada Discreta Wavelet (“Discrete Wavelet Transform” DWT) se va dividiendo la señal en bandas de frecuencias que están compuestas por coeficientes Wavelet. Estos coeficientes Wavelet se corresponden con los datos de la señal temporal que mejor representan esa banda de frecuencia dentro de la señal y que las amplitudes en el dominio del tiempo a las que pertenece también lo son. De esta forma se tiene una ventaja importante en el análisis de señales con respecto a la STFT. Como se puede ver, en comparación con la STFT, la descomposición Wavelet es mucho más útil y es más apropiada para el análisis que lleva a cabo este proyecto.

Para obtener esas bandas de frecuencia, la señal temporal pasa por una serie de filtros paso bajo y paso alto para conseguir descomponer la señal. De forma que se obtiene en el dominio del tiempo una serie de muestras que corresponden a una banda de frecuencias. En el primer nivel de la transformada wavelet la señal pasa por un filtro paso bajo, consiguiendo lo que se denominan “coeficientes de aproximación” y por un filtro paso alto, obteniendo los coeficientes de detalle. A partir del segundo nivel las señales que van a pasar por los filtros paso bajo y alto van a ser las señales correspondientes a los coeficientes de aproximación. Además cada nivel de

descomposición implica que el número de muestras que componen cada banda de frecuencias es la mitad del anterior.

En la siguiente figura se puede observar un esquema de la descomposición Wavelet donde los coeficientes de aproximación se denotan como “cA” y los de detalle como “cD”. El nivel de descomposición se indica mediante los números que están al lado de los coeficientes [2].

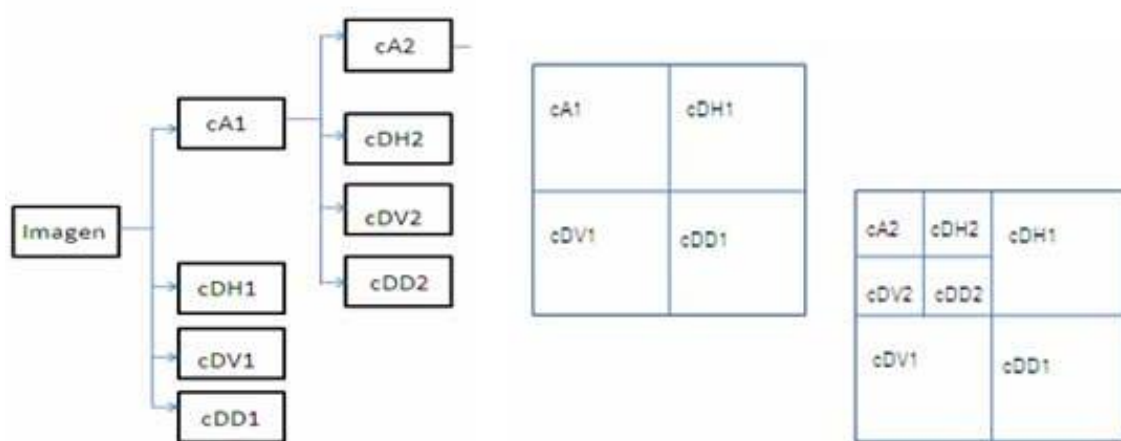


Ilustración 2.3 Estructura de una descomposición Wavelet [3]

## 2.6. LA TRANSFORMADA WAVELET PACKET

Concretando aún más, en este proyecto se va a utilizar una DWT especial, la Transformada Wavelet Packet (“Wavelet Packet Decomposition” WPD). Esta transformada se diferencia de la DWT “normal” en que la señal pasa por más filtros. Estos es, la WPD no solo va dividiendo las señales correspondientes a los coeficientes de detalle.

Por ejemplo, si las muestras experimentales estaban formadas por 40.000 datos y fueron tomados a una frecuencia de muestreo de 5.000Hz el primer nivel de descomposición estará formado por dos señales de 20.000 datos (coeficientes Wavelet):

una de las señales estará comprendida entre 0 y 1.250Hz y la otra entre 1.250 y 2.500Hz. Los rangos de frecuencia van de 0 a 2.500Hz y no de 0 a 5.000Hz debido al Teorema de Nyquist. El cual demuestra que para que la reconstrucción de una señal periódica continua en banda base a partir de sus muestras sea posible, la señal debe estar limitada en banda y la tasa de muestreo debe ser superior al doble de su ancho de banda. Por lo tanto, de esta forma, se realiza otro nivel de descomposición, y se obtendrá el segundo nivel con cuatro señales de 10.000 coeficientes Wavelet estando comprendidos en los siguientes intervalos de frecuencia: 0 – 625Hz, 625 – 1250Hz, 1250 – 1875Hz y 1875 – 2500Hz [2].

En la figura 2.2 se representa un ejemplo de descomposición Wavelet Packet para que se vea de una forma más clara lo explicado anteriormente. Siendo “J” el nivel de descomposición y estando las señales clasificadas mediante dos números, el primero indica la escala y el segundo la posición dentro de la misma (teniendo en cuenta que empiezan desde 0 y que el número de cada nivel de descomposición es  $2^J$ ).

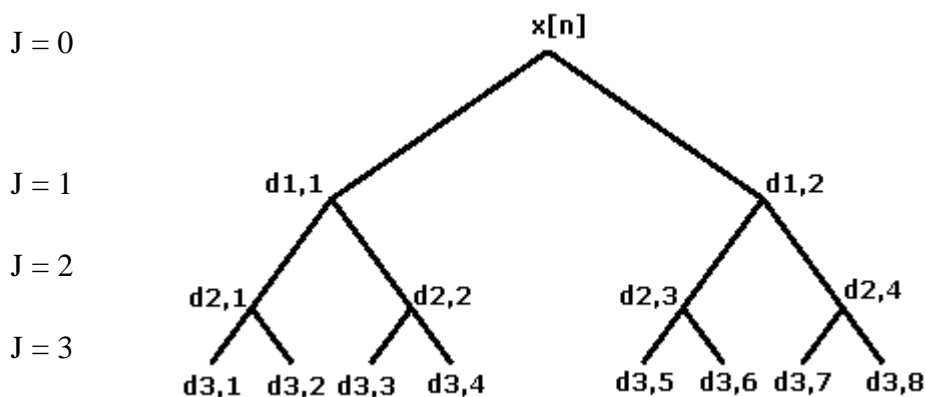


Ilustración 2.4 Estructura de una descomposición Wavelet Packet [4]

## 2.7. EL PROBLEMA DE LA SIMETRÍA

Teniendo en cuenta que las señales que se tratan pueden ser supuestas como periódicas y la propiedad de simetría, y suponiendo que se quieren obtener las

frecuencias del intervalo  $(\pi/T, 2\pi/T)$ , el resultado es la imagen simétrica de las frecuencias correspondientes al intervalo  $(0, \pi/T)$  [14].

Como se comentó en el apartado 2.5 cuando se describía la transformada Wavelet Packet la señal pasa por una serie de filtros paso alto y paso bajo y en cada paso de la descomposición a la señal se le asignan unos coeficientes. A diferencia de la transformada Wavelet, aquí también se aplican los filtros al intervalo  $(\pi/2T, \pi/T)$  además del  $(0, \pi/2T)$  que ya se le aplicaba en la transformada Wavelet. Cuando se aplican los filtros a esta nueva parte las frecuencias altas y bajas aparecen cambiadas ya que las frecuencias en este intervalo son las simétricas del primer intervalo como se ha explicado anteriormente. Debido a esto el orden de las frecuencias en el análisis Wavelet Packet está modificado [14].

Como se puede apreciar en la figura 4.1 existe una relación con los números que se corresponden a cada elemento, siendo esta relación más obvia cuando están los números en sistema binario.

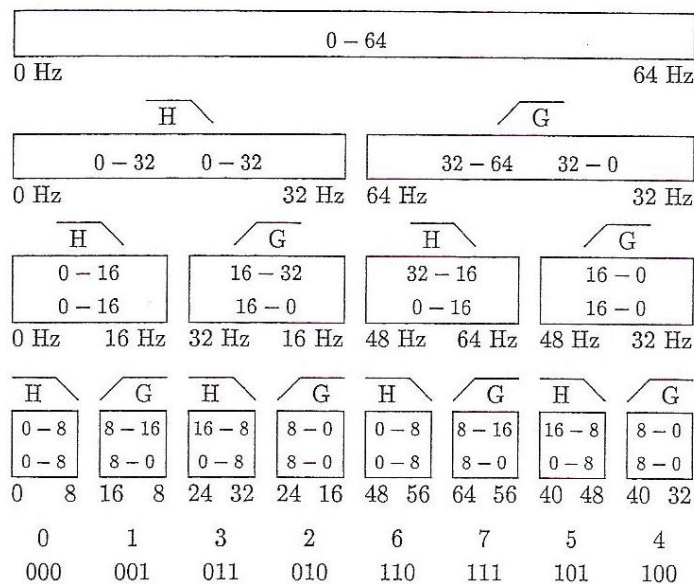


Ilustración 2.5 Ejemplo descomposición de una señal [14]

La secuencia de estos número se conoce como “*Gray code sequence*” o “*Código de Gray*”. Se define a continuación: dado un número entero  $n$  que se puede escribir en binario como  $n_{N+1}n_Nn_{N-1}\dots n_2n_1$  tal que  $n_i$  sea 0 ó 1, teniendo en cuenta que se ha añadido un 0 al comienzo. El Código de Gray (GC( $n$ )) define entonces su representación binaria. GC( $n$ ) $_i$  es el  $i$ -ésimo dígito binario y se calcula con la ecuación 5:

$$GC(n)_i = n_i + n_{i+1} \quad \text{Ecuación 5}$$

Siendo la inversa la que se obtiene de aplicar la ecuación 6:

$$IGC(n)_i = \sum_{k \geq i} n_k \quad \text{Ecuación 6}$$

Cuya suma es finita para un entero  $n < 2^N$  y  $n_k = 0$  para  $k > N$ .

Sabiendo esto se pueden reordenar los elementos de la ilustración 2.5 que quedarían como se muestran en la Ilustración 2.6.

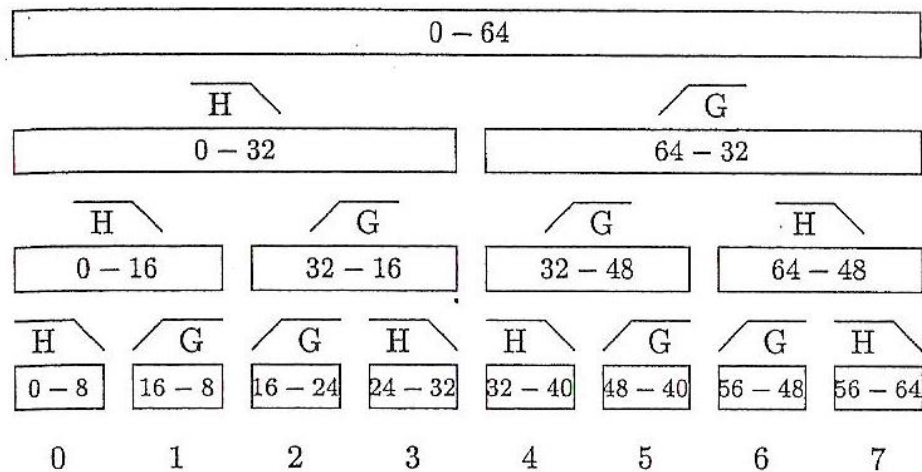


Ilustración 2.6 Orden natural de las frecuencias de la señal [14]

Por lo que si se desea mantener las frecuencias en su orden natural es necesario intercambiar la posición de las frecuencias altas y bajas después de cada paso de la DWT.



Aún y con todo esto no es perjudicial ya que nos ofrece dos posibilidades para ordenar las frecuencias. Algunas veces es importante mantener las frecuencias en su orden correcto, en especial si se desea trabajar en el plano tiempo-frecuencia y no tanto en el caso de compresión y eliminación del ruido [14].

## **3.ADQUISICIÓN DE DATOS Y POSTPROCESADO DE LOS MISMOS**

### **3.1. SISTEMA EXPERIMENTAL**

Para llevar a cabo todas las medidas necesarias ha sido necesario disponer de un sistema mecánico adecuado para ello así como los dispositivos necesarios para la adquisición y tratamiento de las señales. Los requerimientos principales que se le piden al sistema es que reproduzca de la manera más certera posible las condiciones deseadas del ensayo y que se puedan obtener las señales de una manera fiable y que no sean distorsionadas ni modificadas. Por otra parte, dentro de este apartado también se

describirán los distintos pasos que se han dado en la obtención las señales una vez ya se tiene el sistema experimental.

El sistema experimental consta de los siguientes elementos:

- Banco de ensayos, el eje se encuentra en ese apartado.
- Acelerómetro
- Sistema de acondicionamiento
- Software de adquisición

Para describir los siguientes apartados se ha tomado como base el Informe Rankine A2-T2.4 [6]

### 3.1.1. BANCO DE ENSAYOS

El banco de ensayos utilizado es una máquina de simulación de fallos llamada ROTOKIT el cual se compone de una bancada, un motor eléctrico el cual proporcionará el movimiento al eje y las sujeciones correspondientes para el eje y el motor. También dispone de una cubierta de seguridad. Como sistemas complementarios el ROTOKIT también dispone de una caja de derivación externa y un tacómetro digital para poder controlar los parámetros del mismo.

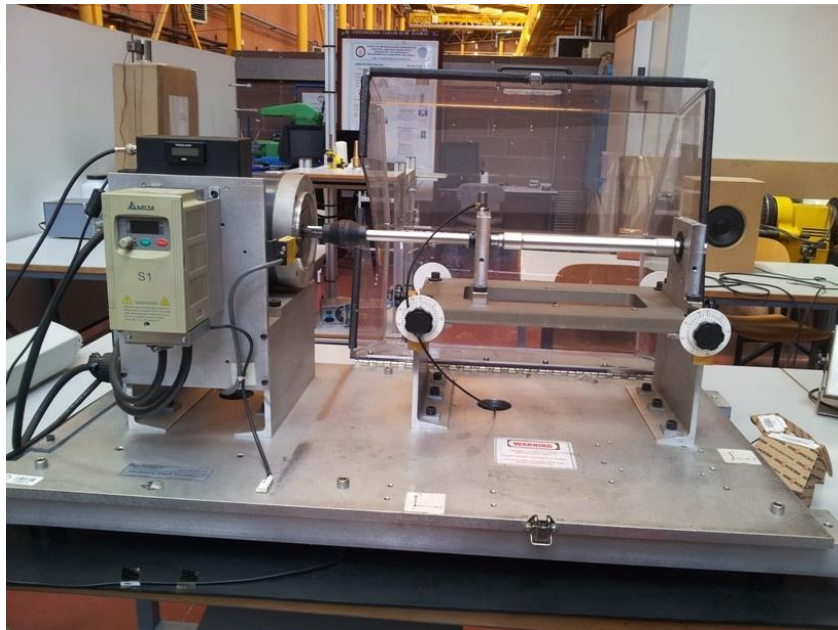


Ilustración 3.1 Banco de ensayos [6]

La máquina de fallos ha sido previamente analizada para evitar el desalineamiento, las vibraciones en los engranajes, las vibraciones en los rodamientos y el desequilibrado [5].

Para operar con esta máquina es necesario cumplir las siguientes condiciones de seguridad:

**Condiciones de seguridad para el correcto funcionamiento de la máquina [5].**

1. No someter a la máquina a vibraciones excesivas durante un largo periodo de tiempo.
2. Evitar superar el 20% de la velocidad crítica de diseño por un tiempo mayor de 30 segundos en cada uso.
3. No sobrepasar la velocidad de 6000 RPM (aplicable para simuladores de corriente alterna) por un tiempo mayor de 30 segundos.

En este caso la velocidad máxima que se va a alcanzar es, como se va a decir más adelante, de 3600RPM (60Hz) por lo que se cumple la condición de seguridad.

### **Condiciones seguras de trabajo [5]**

1. Trabajar con el simulador de fallo única y exclusivamente mientras la cubierta está cerrada (los elementos rotatorios pueden ser excesivamente peligrosos). No abrir el cerrojo bajo ninguna circunstancia ya que está diseñado para evitar la apertura de la cubierta durante el funcionamiento.
2. Antes de abrir la cubierta esperar a que los elementos rotatorios estén completamente detenidos.
3. Utilizar siempre gafas de seguridad durante el trabajo con la máquina.
4. Mantener el cabello, la ropa, los dedos y otras partes del cuerpo alejados de los elementos en movimiento.
5. Trabajar en ambientes y lugares seguros.
6. No tensar en exceso los cables eléctricos de la máquina, manteniéndolos lejos de superficies calientes.
7. Mantener los cables extendidos libres de obstáculos durante todo el tiempo.
8. Reducir la posibilidad de desconexión de los cables eléctricos durante la operación, procurando que estén lo más extendidos posibles.
9. Asegurarse de que la superficie sobre la que se realice el ensayo sea estable.
10. Inspeccionar la máquina completamente antes de su uso por si ha sufrido algún tipo de daño o avería.
11. Apagar todos los dispositivos y esperar a que el motor se detenga antes de desconectar la máquina de la fuente de corriente.

12. No utilizar la máquina si los dispositivos no se han conectado o desconectado anteriormente de forma correcta.

13. Para evitar un posible “shock” eléctrico se debe de tener en cuenta que:

- No superar los 220 V en corriente alterna.
- Desconectar la máquina de la fuente de corriente para su limpieza y mantenimiento.
- Desconectar los cables eléctricos de la fuente mientras se realizan los ajustes de control del motor.
- No trabajar en ambientes húmedos.
- Inspeccionar el estado de los enchufes antes de cada uso.
- No operar con la máquina si la fuente o los cables eléctricos están dañados.

### 3.1.2. EJE

Los ejes sobre los que se ha trabajado son ejes ferroviarios a escala 1/8 cuyas dimensiones se pueden observar en la Ilustración 3.2.

Estos ejes se han ensayado con diferentes tamaños de defectos. Todos los defectos son iguales excepto por la profundidad del mismo: son fisuras en el centro del eje con un grosor de 1mm.

- Eje sano – sin defecto.
- Eje con nivel de defecto 1, tamaño de defecto: 0.87mm (4.2% respecto al diámetro del eje 20.77mm).

- Eje con nivel de defecto 2, tamaño de defecto: 1.74mm (8.4% respecto al diámetro del eje).
- Eje con nivel de defecto 3, tamaño de defecto: 2.61mm (12.6% respecto al diámetro del eje).
- Eje con nivel de defecto 4, tamaño de defecto: 3.48mm (16.7% respecto al diámetro del eje).
- Eje con nivel de defecto 5, tamaño de defecto: 4.64mm (22.3% respecto al diámetro del eje).
- Eje con nivel de defecto 6, tamaño de defecto: 5.80mm (27.9% respecto al diámetro del eje).
- Eje con nivel de defecto 7, tamaño de defecto: 6.96mm (33.5% respecto al diámetro del eje).
- Eje con nivel de defecto 8, tamaño de defecto: 8.71mm (41.9% respecto al diámetro del eje).
- Eje con nivel de defecto 9, tamaño de defecto: 10.46mm (50.3% respecto al diámetro del eje).

Debido a errores de fabricación, el nivel de defecto 4 no se ha podido ensayar con él con lo que no ha datos para este eje.

Las dimensiones del eje aparecen descritas en detalle en el ANEXO A DIMENSIONES DEL EJE.

### 3.1.3. ACELERÓMETRO

El sensor utilizado es un acelerómetro uniaxial tipo 4383 del fabricante Brüel & Kjaer y su posición en el sistema es la que se muestra en la Ilustración 3.2:

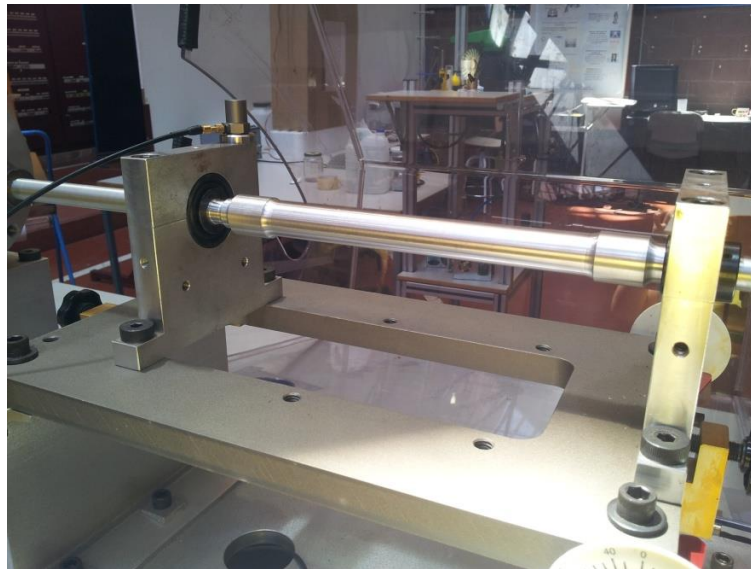


Ilustración 3.2 Posición del acelerómetro [6]

Las características del mismo se muestran a continuación:

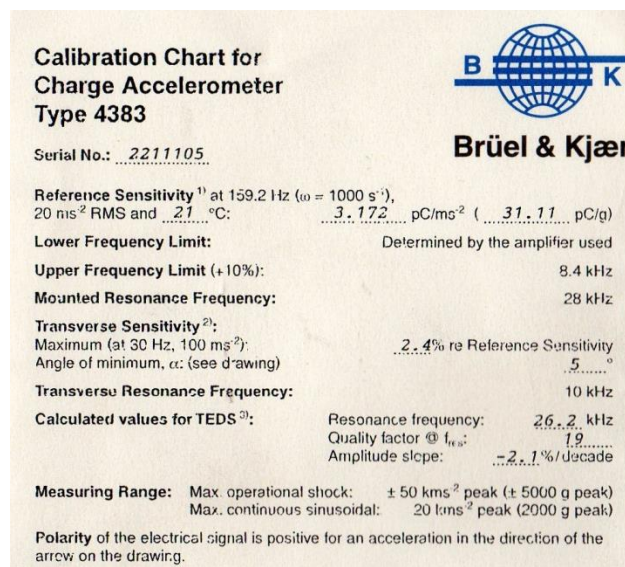


Ilustración 3.3 Características del acelerómetro [7]

Como se puede observar la frecuencia límite superior son 8.4kHz. En este trabajo la máxima frecuencia con la que se trabaja es 6kHz, como se explicará en posteriores apartados, por lo que no hay problema.



#### 3.1.4. SISTEMA DE ACONDICIONAMIENTO DE LAS SEÑALES

Las señales obtenidas con el acelerómetro pasan a través de un dispositivo Brüel & Kjaer, Nexus 2693 que amplifica y filtra la señal de la siguiente manera:

Filtro paso bajo	0.1Hz
Filtro paso alto	3kHz
Ganancia	10
Sensibilidad	3.172 pC/ms <sup>-2</sup>

Tabla 3.1 Parámetros de trabajo del acondicionador Nexus 2693

Después de que las señales han sido filtradas y amplificadas llegan a la tarjeta de adquisición modelo KEITHLEY 3100 para que desde aquí lleguen al ordenador.

#### 3.1.5. SOFTWARE DE ADQUISICIÓN Y TRATAMIENTO DE LOS DATOS

Una vez que las señales llegan al ordenador el software específico “Btool” programado en Matlab® se encarga de la adquisición de las mismas y su posterior tratamiento. Este software adquiere los datos mediante la tarjeta KEITHLEY, aunque tiene otros modos de adquisición de datos [13].

A continuación se explicarán en qué condiciones y que pasos se han seguido para obtener los datos a través de esta herramienta.

El programa trabaja en modo Real, esto es, la señal se adquiere mediante la tarjeta KEITHLEY como sea dicho antes. La tarjeta a su vez funciona de manera automática. El objetivo de esta función de trabajo es dejar al software que trabaje adquiriendo información realizando repeticiones continuas de un mismo ensayo de trabajo para posteriormente comparar los datos obtenidos y sacar conclusiones [13].

El software “Btool” permite la opción de tratar los datos mediante un promediado de 100 funcionales calculados de 100 señales tomadas de forma consecutiva. Esto se hace para eliminar posibles aspectos no periódicos y ruidos que pudieran estar presentes. Por lo que esta opción es la que se elige. En el orden práctico, esto significa que cada vez que se mida se obtendrán 100 archivos de datos.

En este caso la señal es muestreada con una frecuencia de 6000 Hz puesto que por encima de los 3000 Hz ya no aparecen frecuencias del sistema analizado lo cual es deseable. La señal tiene una longitud de  $2^{14}$  puntos, esto es 16384 puntos. El hecho de que sea potencia de 2 evita el fenómeno de “zero padding” [9]. Otra ventaja de este valor, es que el tiempo de adquisición es de 2.73 segundos y en el peor de los casos, velocidad de rotación 20 Hz, se miden 54 ciclos enteros, con lo que la información obtenida es bastante sabiendo además que la medida se repite 100 veces seguidas.

### 3.1.6. TOMA DE MEDIDAS

Como se ha mencionado anteriormente se van a tomar datos de ejes con diferentes tamaños de defecto. Para cada tamaño de defecto se van a ensayar diferentes velocidades:

- 20 Hz (1200rpm)
- 40 Hz (2400rpm)
- 60 Hz (3600rpm)

Para tomar estas medidas durante los ensayos se sigue el protocolo que se describe a continuación:

---

### **PROTOCOLO DE MEDIDAS DE ROTOKIT:**

1. COMPROBAR EL MONTAJE DE ROTOKIT, QUE ESTÉ TODO AJUSTADO Y QUE NO HAYA NADA SUELTO O SIN APRETAR.
2. COMPROBAR QUE EL ACELERÓMETRO ESTÁ EN SU SITIO, QUE EL CABLE ESTÁ BIEN APRETADO, Y QUE ADEMÁS NO VA A ROZAR CON EL EJE NI CON NINGÚN ELEMENTO MECÁNICO.
3. CERRAR LA COMPUERTA DE SEGURIDAD.
4. ENCHUFAR EL MOTOR Y FIJAR LA VELOCIDAD A 20HZ PARA NO HACER UN ARRANQUE MUY BRUSCO.
5. ARRANCAR EL MOTOR.
6. MIENTRAS EL SISTEMA MECÁNICO SE CALIENTA, COMPROBAR EL SISTEMA DE MEDIDA: ENCENDER EL ACONDICIONADOR Y EL ORDENADOR. COMPROBAR QUE TODO ESTÉ CORRECTAMENTE COLOCADO, LAS CONEXIONES BIEN PUESTAS Y FIJADAS.
7. COMPROBAR QUE LOS PARÁMETROS DEL ACONDICIONADOR DE SEÑAL (NEXUS) ESTÁN AJUSTADOS:  
  
FILTRO PASO BAJO: 0.1Hz      FILTRO PASO ALTO: 3kHz  
  
GANANCIA: 10      SENSIBILIDAD: 3.172 pC/ms<sup>-2</sup>
8. COMPROBAR LA BATERÍA DEL ACONDICIONADOR DE SEÑAL, DE MODO QUE VEAMOS QUE SE PUEDE GARANTIZAR QUE VA A SOPORTAR LA SESIÓN DE MEDIDAS (MÁS DEL 20% DE SU CAPACIDAD). SI NO ES ASÍ, SE SUSTITUIRÁ POR OTRA.
9. HACER UNA MEDIDA DE PRUEBA COMO MÉTODO DE CALIBRACIÓN DEL SISTEMA. LAS PRIMERAS SESIONES DE MEDIDA SERÁ CONVENIENTE QUE ESTA PRIMERA MEDIDA SEA SUPERVISADA. POSTERIORMENTE SE PUEDE

COMPROBAR QUE EL SISTEMA ESTÁ BIEN MONTADO POR LA EXPERIENCIA O MEDIANTE UN OSCILOSCOPIO.

10. LAS CONDICIONES DE LA OPERACIÓN SERÁN:
  - a. FRECUENCIA DE MUESTREO 6000HZ
  - b. NÚMERO DE PUNTOS EN CADA MEDIDA 16384 (214).
11. CADA VEZ QUE SE REALICE UNA MEDIDA, SE CORTARÁN LOS FICHEROS DE LA CARPETA LLAMADA “REGISTROS AUTOMÁTICOS”, Y SE LLEVARÁN A LA CARPETA QUE CORRESPONDA DE MEDIDAS. DE ESTE MODO, CADA VEZ QUE SE INICIE OTRA MEDIDA, DICHA CARPETA DEBE ESTAR VACÍA.
12. HACER 6 SERIES DE MEDIDAS, CADA UNA DE ELLAS DE 100 CICLOS CADA UNO DE ELLOS CON LAS CONDICIONES DEL PUNTO 9. LAS MEDIDAS SE HARÁN VARIANDO LA VELOCIDAD DEL MOTOR SEGÚN LA SIGUIENTE SECUENCIA: 20Hz 40Hz 60Hz 20Hz 40Hz 60Hz.
13. RELLENAR LA HOJA EXCEL DE LOS ENSAYOS SIUTANDO LAS CONDICIONES, QUE ESTÁ DENTRO DE LA CARPETA ROTOKIT.
14. UNA VEZ FINALIZADOS LOS ENSAYOS, ASEGURARSE DE QUE DESENCUFAMOS EL ROTOKIT, DE MODO QUE SIEMPRE QUE NO ES ESTÉ ENSAYANDO LA MÁQUINA ESTÉ DESENCUFADA.
15. COMPROBAR LA BATERÍA DEL ACONDICIONADOR, Y SI ESTÁ BAJA, AVISAR A MARÍA JESÚS PARA PONERLAS A CARGAR.

### 3.2. TRATAMIENTO, PROCESADO Y ANÁLISIS DE LOS DATOS

Estudios preliminares han detectado que la Energía calculada mediante la Transformada Wavelet Packet es un buen indicador de fallo, habiendo ciertas frecuencias en las que la energía parece aumentar con el nivel de defecto, que son las que se muestran en la Tabla 3.2 Paquete energía relevantes por cada frecuencia..

<b>Frecuencia</b>	20 Hz		40 Hz		60 Hz	
<b>Paquetes</b>	14	16	27	31	17	18

Tabla 3.2 Paquete energía relevantes por cada frecuencia.

Estos paquetes de frecuencias están relacionados con la componente “3x” de la velocidad de giro en todos los casos. Esto no es casualidad ya que los armónicos de la velocidad de giro son buenos indicadores de defecto.

Como se ha comentado en la Introducción 1, este proyecto trata de cuantificar estos resultados y de generar curvas de probabilidad de detección con base en los resultados de la energía WPT de las frecuencias mencionadas. Y posteriormente diseñar un sistema de clasificación.

A la hora de diseñar el sistema de clasificación, la primera opción es utilizar redes neuronales ya que en trabajos previos han dado muy buenos resultados. También se utilizarán otros métodos típicamente usados para clasificar las respuestas obtenidas en técnicas de inspección no destructivas (NDT).

En este capítulo se explicará el tratamiento de que se le ha dado a las señales desde que son obtenidas hasta que se obtienen los resultados finales.

### 3.2.1. CÁLCULO DE LA DESCOMPOSICIÓN DE LA SEÑAL Y SU ENERGÍA

Como se ha comentado en el apartado 3.1.5, en cada medida de cada velocidad se obtienen 100 archivos con una señal en cada uno. Además cada señal tiene una longitud de  $2^{14}$  puntos. Es decir, cada vez que se miden, por ejemplo, 20Hz, se obtienen 100 señales con 16384 ( $2^{14}$ ) puntos en cada archivo.

Teniendo en cuenta que para cada nivel de defecto se han medido 3 frecuencias (20Hz, 40Hz y 60Hz) y para cada una se han tomado un mínimo de 16 medidas, el nivel de datos, información y archivos con los que se trabaja es bastante grande.

En la Tabla 3.3 Estructura de un fichero de datos aparecen los datos que se verían al abrir un fichero “.dat”. En esta tabla no se muestran todos los datos ya que no es viable mostrar los 16384 totales, por ello solo se muestran las 8 primeras filas.

*	1	16384	6000
*	Canal	1:	sin(1t)
0.007326			
0.017094			
0.012210			
-0.002442			
0.007326			
-0.012210			

Tabla 3.3 Estructura de un fichero de datos

Como se puede observar, en las dos primeras filas del fichero hay información relativa a cómo se han extraído los datos. El “Canal 1” y “sin(1t)” se refiere a opciones que ofrece el software “Btool”; “6000” hace referencia a la frecuencia de muestreo de 6000Hz (apartado 3.1.5); finalmente “16384” se refiere al número de puntos de la señal, es decir la longitud de la misma.

En la siguiente figura se representa una señal obtenida a 20hz con un nivel de defecto 3.

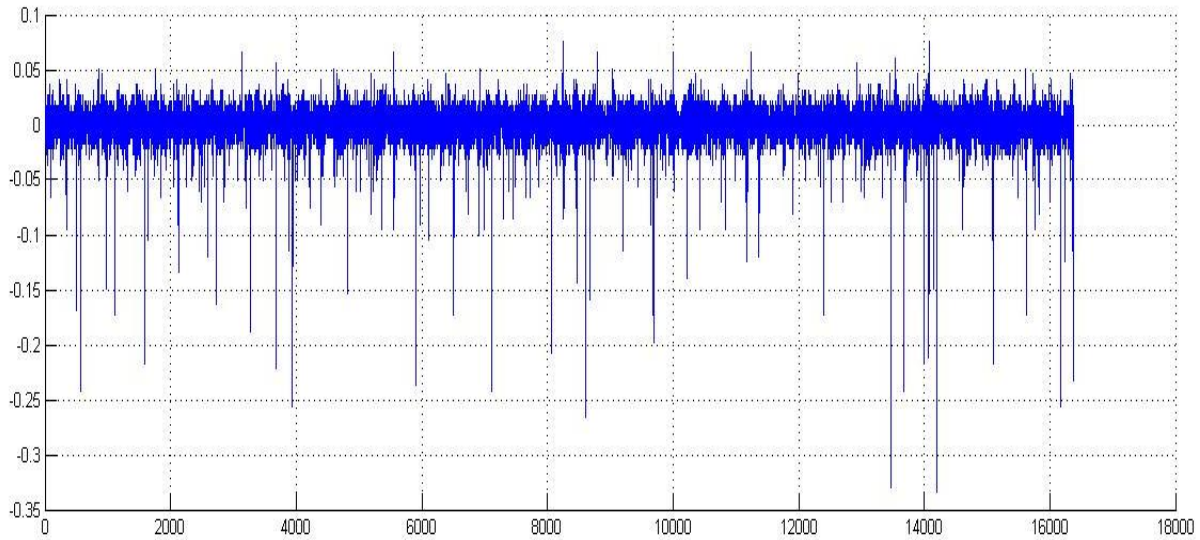


Ilustración 3.4 Representación señal a 20hz con defecto nivel 3.

Para calcular la descomposición Wavelet Packet nivel 9 de las señales que están en los ficheros se han utilizado funciones propias de Matlab así como opciones de la Toolbox de Wavelet. En estos programas se llevan a cabo todos los cálculos necesarios utilizando para ello funciones propias de Matlab como “wpdec” que calcula la descomposición Wavelet Packet en función de ciertos parámetros, entre ellos el nivel de descomposición. Este nivel de descomposición, 9 en este caso, viene dado por estudios preliminares.

El resultado de estos programas son matrices de dimensiones 512x100. El hecho de que haya 512 filas es porque el nivel de descomposición es 9 ( $2^9=512$ ) como se explica en el apartado 2.6. Y son 100 columnas porque, como también se ha comentado, cada vez que se mide se obtienen 100 archivos con 100 señales. Por lo tanto, se obtienen tantas matrices como medidas se hayan hecho para esa velocidad y nivel de defecto.

En cada una de las 512 filas se recogen las energías de cada paquete, o lo que es lo mismo, la energía en valor absoluto de cada intervalo de frecuencia, según lo explicado en el apartado 2.6.

Por otra parte, no todos los paquetes o intervalos de frecuencia son igual de relevantes para este proyecto. Estudios previos del departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Carlos III de Madrid muestran que según la frecuencia a la que gire el eje y se mida, hay intervalos de frecuencia que son más relevantes para el estudio que otros. En la Tabla 3.2 se muestran los paquetes más relevantes, y que serán los que se estudien, en función de la frecuencia.



## 4. SISTEMAS DE CLASIFICACIÓN

A continuación es necesario evaluar si se puede o no, con los datos de los que se disponen, detectar un fallo en un eje. Esto se llevará a cabo de dos formas diferentes con el fin de comprobar los resultados que arrojen. La primera evaluación será el análisis mediante redes neuronales y la segunda mediante el método de Señal de Respuesta o “Signal Response”. Por último se dibujarán las curvas de probabilidad de detección (POD) para ambos casos.

### 4.1. REDES NEURONALES

La primera forma de clasificar la energía de la señal para intentar diseñar un sistema de clasificación es mediante redes neuronales.

---

La justificación de la utilización de este método es, además de trabajos anteriores en los que se ha aplicado con éxito, que el autoaprendizaje de la red puede ser útil y sirve para reducir el número de ensayos necesarios aparte de las ventajas que el propio uso de las redes neuronales conlleva.

#### 4.1.1. FUNDAMENTOS

Darpa (1988), define una red neuronal como un sistema compuesto de muchos elementos simples de procesamiento los cuales operan en paralelo y cuya función es determinada por la estructura de la red, el peso de las conexiones; realizándose el procesamiento en cada uno de los nodos o elementos de computo. Por otro lado, según Haykin (1994), una red neuronal es un procesador paralelo masivamente distribuido que tiene una facilidad natural para el almacenamiento de conocimiento obtenido de la experiencia para luego hacerlo utilizable [18].

Estas dos definiciones se refieren a las redes neuronales artificiales (RNA), aunque en este contexto esta última palabra se obvia. Pero a continuación se diferenciará entre las redes neuronales artificiales y la red neuronal del cuerpo humano sobre la cual se basan las primeras, para así poder explicarlas.

En el cuerpo humano se encuentran 3 elementos fundamentales: los órganos receptores que recogen información del exterior; el sistema nervioso que transmite la información, la analiza y en parte almacena, y envía la información elaborada y, los órganos efectores que reciben la información de parte del sistema nervioso y la convierte en una cierta acción. La unidad fundamental del sistema nervioso es la neurona, las cuales se unen unas con otras formando redes. Por ello, se puede ver que el sistema neuronal es un conjunto de neuronas conectadas entre si, que reciben, elaboran y transmiten información a otras neuronas, y que dicha información se ve potenciada o inhibida en la siguiente neurona a conveniencia. De hecho, esta propiedad de poder alterar el peso de cada información en la red neuronal nos otorga en cierta medida la capacidad de aprender [19].

Las redes neuronales artificiales intentan emular a las redes neuronales biológicas explicadas en el párrafo anterior. Por lo que el elemento fundamental de una red neuronal artificial también será una neurona.

Las neuronas se conectan entre si según una determinada arquitectura. Cada conexión tiene un determinado peso ( $W$ ) que pondera cada entrada a la neurona. De esta manera la entrada de cada neurona es la suma de las salidas de las neuronas conectadas a ella, multiplicadas por el peso de la respectiva conexión. Los valores de estos pesos son ajustados durante la fase de aprendizaje. El valor total de entrada que recibe una neurona se transforma según una función específica denominada función de activación ( $F$ ). Dicha señal transformada pasa a ser la salida de la neurona [19]. Sirva como ejemplo de lo explicado la Ilustración 4.1.

Además las neuronas se agrupan en distintas capas: una capa de entrada, otra de salida y una o varias capas ocultas. Estas capas se interconectan según sea la arquitectura de la red.

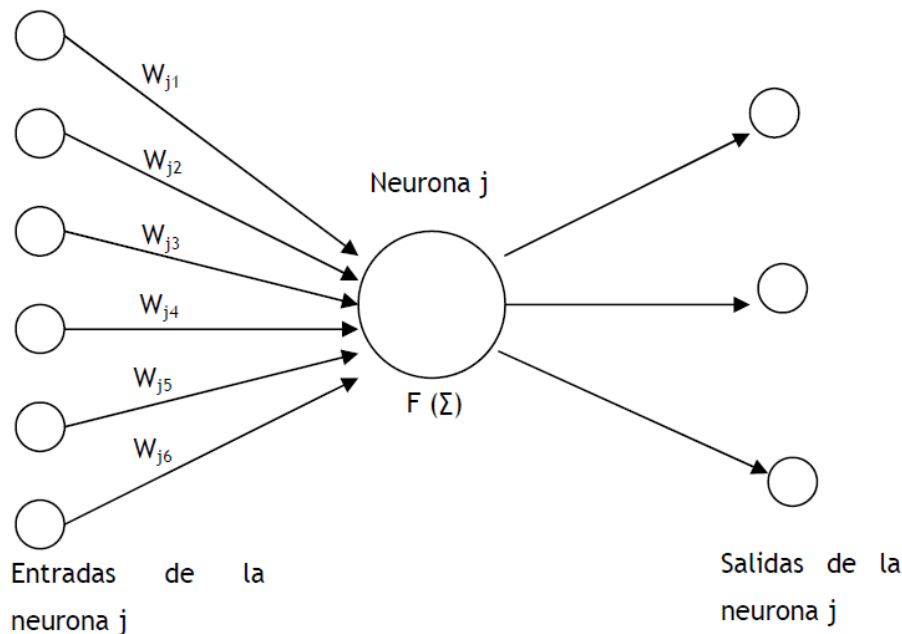


Ilustración 4.1 Esquema de funcionamiento de una neurona [19]

En la utilización de las redes neuronales hay dos fases: la fase de entrenamiento o aprendizaje y la de prueba o utilización.

El aspecto más importante y delicado de redes neuronales es el aprendizaje. Las RNA son sistemas de aprendizaje basadas en datos que son utilizados como patrones. Por ello la capacidad de una red de resolver un problema está muy ligada a los patrones utilizados durante su fase de aprendizaje. Esto consiste en hallar los valores precisos de los pesos de sus conexiones para que pueda resolver un determinado problema. El proceso general consiste en ir introduciendo una serie de datos patrón y ajustar los pesos siguiendo un determinado criterio [19]. Teniendo en cuenta esto último, lo normal es utilizar una serie de datos para el entrenamiento y guardar el resto para la fase de validación. Esta fase de aprendizaje puede ser supervisado o no.

Otro concepto importante es el “*spread*”, el cual tiene que ver con la propagación de la red. Si el “*spread*” es casi cero la red actuará como un clasificador de los vecinos más cercanos, y según va creciendo, la red diseñada tendrá en cuenta más vectores de diseño cercanos.

#### 4.1.2. ARQUITECTURA

Como se ha comentado antes, las neuronas se distribuyen en capas y estas capas se organizan de una determinada manera en función de la arquitectura de la red. Por lo general podemos clasificar las redes según diferentes criterios:

Según el número de capas:

- Monocapa: sería la red más sencilla ya que tiene una capa de neuronas que en la propia capa de salida se realizan los cálculos mientras que una capa de entrada solo proyecta las entradas en la capa de salida.

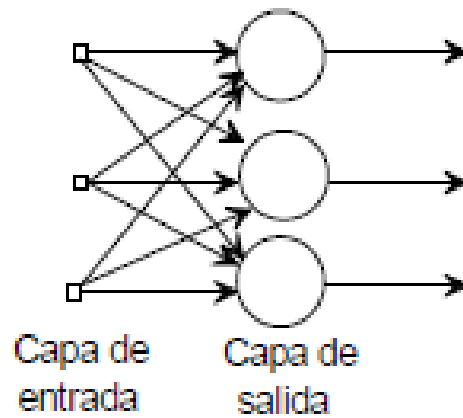


Ilustración 4.2 Red neuronal monocapa [20]

- Multicapa: Generalización del paso anterior donde existen capas intermedias ocultas entre la de entrada y la de salida.

Según el tipo de conexiones:

- No recurrentes: en este tipo de redes la propagación de las señales se produce en un único sentido, sin realimentación.
- Recurrentes: en este tipo de redes sí que existe realimentación. Esta se puede dar incluso entre neuronas de diferentes capas o en la misma neurona.

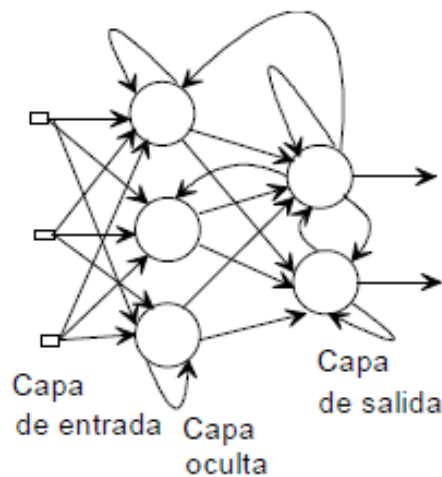


Ilustración 4.3 Red neuronal recurrente [20]

Según el grado de conexión:

- Totalmente conectadas: todas las neuronas de una capa están conectadas con las de la siguiente o las de la anterior.
- Parcialmente: no todas las neuronas de una capa están conectadas con las neuronas de las capas previa o siguiente.

#### 4.1.3. APLICACIÓN EN ESTE PROYECTO.

En el caso que nos incumbe, se utilizara la aplicación de Matlab Neural Network para aplicar la red neuronal. Esta red se aplicara para clasificar las señales obtenidas después de la transformación Wavelet correspondiente según su energía. Dicha red es radial (RBF, *Radial Basis Function*) con aprendizaje supervisado. En la Ilustración 4.4 se muestra una imagen de la arquitectura.

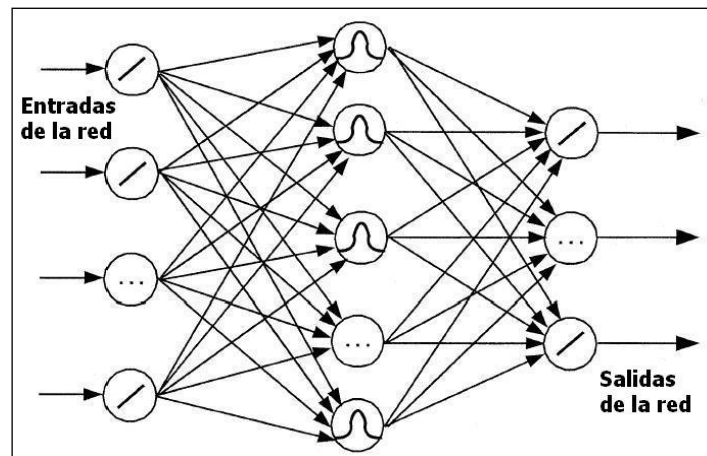


Ilustración 4.4 Red neuronal radial [20]

Para esta parte del proyecto se usan 3 redes, una por velocidad, cada una de ellas con dos entradas que son los dos paquetes de energía. Las redes tienen dos posibles salidas que son solamente sano-defecto. Para la fase de entrenamiento se utiliza el 75% de los datos, y se guarda el 25% de datos para la validación. El criterio de parada es que el error cuadrático medio (MSE) sea menor que el 20%, o que el número de neuronas en la capa oculta alcance el valor de 700.

Parámetros	Selección	
<b><i>Distribución de las entradas de la red</i></b>	Entrenamiento	75 %
	Prueba	25%
<b><i>Tipo de aprendizaje</i></b>	Supervisado	
<b><i>Valores de la salida esperada</i></b>	[0 1]: sano [1 0]: defectuoso	
<b><i>Tipo de redes</i></b>	<i>Función de base radial</i>	
<b><i>Criterios de Parada</i></b>	MSE límite	20%
	Máximo número de Neuronas en capa oculta	[700]

Tabla 4.1 Tabla con las características de la red neuronal utilizada.

#### 4.2. MÉTODO DE SEÑAL DE RESPUESTA OR “SIGNAL RESPONSE”.

Este método es ampliamente usado para evaluar ensayos no destructivos (NDT, Non Destructive Test) tanto en trabajos relacionados con ferrocarriles y ejes como en otros muchos campos [22-24]. Además de estas razones, es importante señalar que las

curvas POD están ligadas al tamaño de la fisura junto con otros parámetros geométricos y físicos por lo que hace el método idóneo.

Las curvas de “Probabilidad de Detección” se representan en un gráfico frente al tamaño de la fisura. Para representar estas gráficas hay dos posibles formas de calcular las funciones que se explicarán a continuación:

- POD para datos “Acierto/Fallo” o “Hit/Miss Data”: esta variante se usa cuando los datos se han obtenido mediante métodos no destructivos donde solo se tiene en cuenta si hay o no hay defecto pero no hay medidas relativas al tamaño del defecto.

- POD para datos de señal de respuesta o “Signal Response Data”: en este caso, la información relativa al tamaño del defecto en términos de señal de respuesta está relacionada por medio de la calibración apropiada a las dimensiones físicas del defecto. Esta variante tiene algunas ventajas sobre la primera: se necesitan menos ensayos, los datos pueden ser procesados para reflejar varios umbrales de señal o “umbrales de decisión” y además es posible estimar resultados para otros tipos de defectos que son más difíciles de experimentar. Este método asume que los datos siguen una distribución log-normal.

Por estas razones la variante elegida para postprocesar los datos será “Signal Response Data”, ya que se ajusta a los datos de los que se disponen y de cómo se han obtenido. De la misma manera se asume la hipótesis de que los datos de los que se disponen, es decir, las energías, siguen una distribución log-normal.



#### 4.2.1. CURVAS POD PARA DATOS DE SEÑAL DE RESPUESTA O “SIGNAL RESPONSE DATA”.

A continuación se va a explicar en detalle cómo se obtienen las curvas POD partiendo de los datos de los que se disponen en este punto; los cuales explican en el apartado 3.2.1.

Como concepto, la  $POD(a)$  se puede obtener de la relación entre la señal de respuesta “ $\hat{a}$ ”, que en este caso son las energías, y el tamaño del defecto “ $a$ ”, siendo  $g_a(\hat{a})$  la función densidad de probabilidad del valor  $\hat{a}$  para un valor fijo dado [22]:

$$POD(a) = \int_{\hat{a}_{th}}^{\infty} g_a(\hat{a}) d\hat{a}$$

donde  $\hat{a}_{th}$  es el umbral de decisión.

Este umbral de decisión es el valor umbral para la energía a partir del cual hay fallo en el eje, en este caso particular habrá tantos umbrales de decisión como vectores o paquetes de frecuencia. Una correcta elección del valor umbral es crítica ya que de esto depende la tasa de acierto sea o no máxima en la clasificación de defectos.

En la siguiente figura ilustra la ecuación antes descrita para la función POD, esto es, el área sombreada bajo la función de densidad. En esta figura “ $A_{dec}$ ” es el equivalente a “ $\hat{a}_{th}$ ” y “ $A$ ” a “ $\hat{a}$ ”.

Dada la naturaleza estadística de este análisis, el número de datos de los que dispone es importante de cara al intervalo de confianza. En este caso se tiene 226 energías por paquete y velocidad, que es un número superior a los 174 datos que se recomienda en el ANEXO B TERMINOLOGÍA ESTADÍSTICA Y CÁLCULO DE PARÁMETROS ESTADÍSTICOS para que el intervalo de confianza sea del 95%. El intervalo de confianza influye de manera significativa en la forma que tendrá la curva y por lo tanto en el porcentaje de acierto.

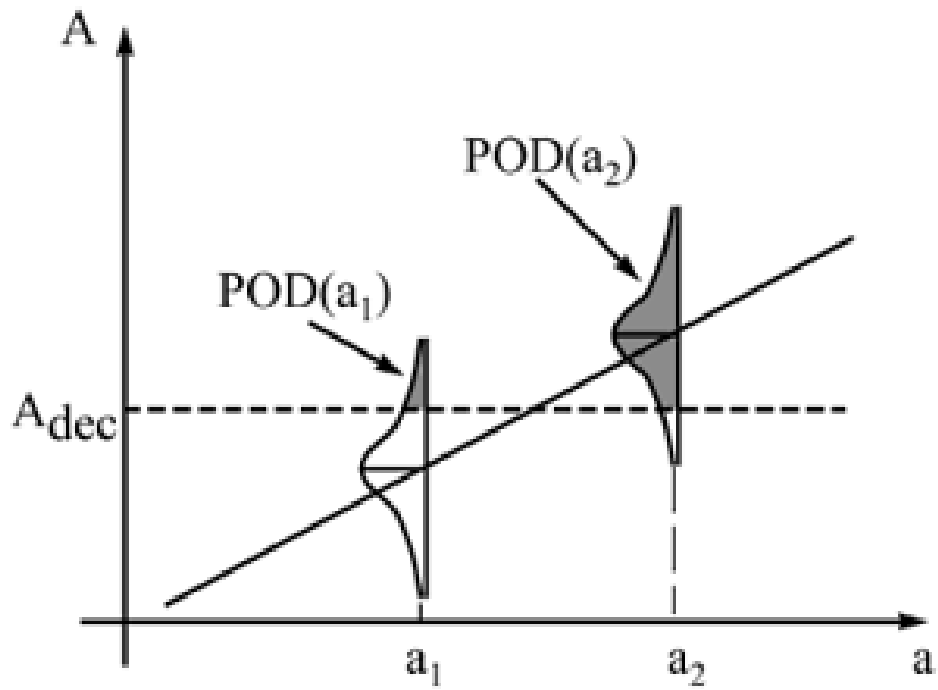


Ilustración 4.5 Representación de la función de densidad de probabilidad [22].

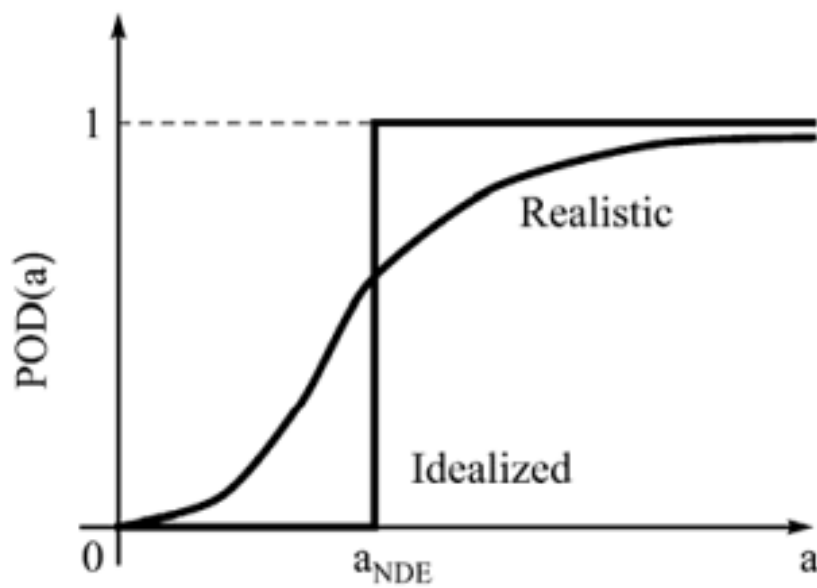


Ilustración 4.6 Representación ideal del POD vs real [22].

Según se puede observar en la Ilustración 4.6, en el caso ideal, todos los defectos mayores que el defecto umbral serían siempre detectados ( $POD(a)=1$ ), mientras que todos los defectos menores que el umbral no serían nunca detectados. Como se puede entender no existe sistema ideal por lo que la curva de la función  $POD(a)$  se representa con una función continua. En la Ilustración 4.7 aparecen representadas tres curvas  $POD$  para tres ejes de acero con defectos según tres métodos de detección de fallo [22].

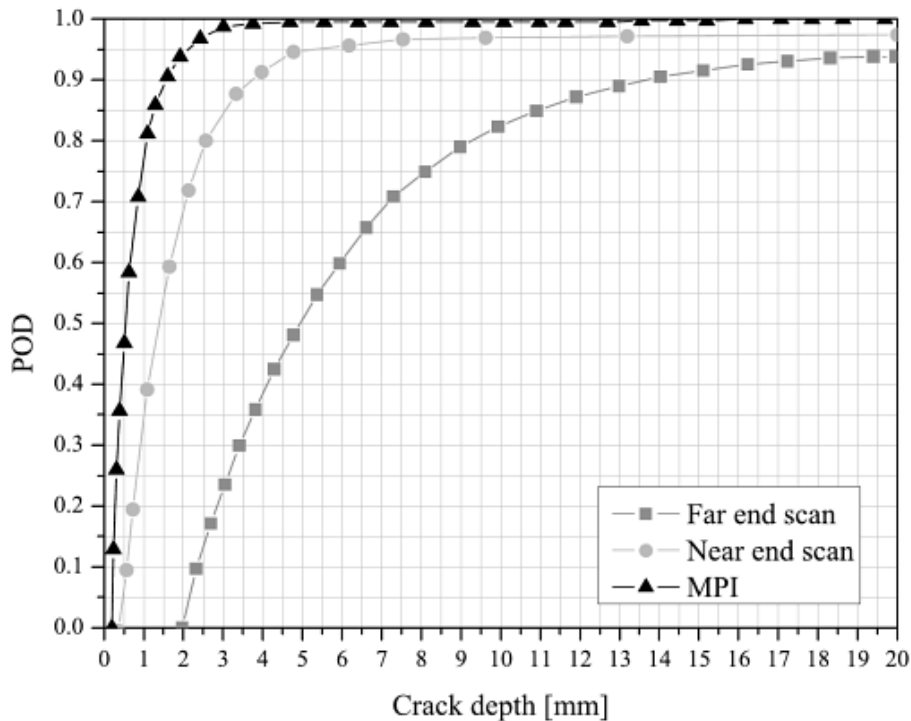


Ilustración 4.7 Representación real de tres curvas  $POD$ .

Con todo lo dicho hasta ahora se puede deducir que existe una relación entre “ $a$ ” y “ $\hat{a}$ ”. Es decir, entre el tamaño del defecto y la señal de respuesta, que como se ha dicho antes es, la energía de la señal. La relación existente se puede expresar de la siguiente manera:

$$\ln(\hat{a}) = \alpha_1 + \beta_1 \cdot \ln(a) + \gamma$$

donde  $\gamma$  es el término del error que está normalmente distribuido con media 0 y desviación estándar  $\sigma_\gamma$ . El término  $\alpha_1 + \beta_1 \cdot \ln(a)$  de la ecuación anterior es la media  $\mu(a)$  de la función probabilidad de detección de  $\ln(\hat{a})$  y  $\sigma_\gamma$  la desviación estándar. En otras

palabras,  $\mu(a)$  es la media de las energías y  $\sigma_\gamma$  la desviación estándar. Según esto, se deduce que  $\ln(\hat{a})$  está normalmente distribuida [23].

Como se ha indicado al principio del apartado, con datos de señal de respuesta el defecto es detectado cuando se supera el umbral  $\hat{a}_{th}$  previamente determinado. Por lo que la función POD(a) para datos de señal de respuesta puede ser expresada como:

$$POD(a) = \text{Probabilidad } (\ln(\hat{a}) > \ln(\hat{a}_{th}))$$

En otras palabras, es el área contenida entre la función densidad de probabilidad de  $\ln(\hat{a})$  y el umbral de evaluación de defecto  $\ln(\hat{a}_{th})$ [23]. Y usando notación estadística la ecuación quedaría de la siguiente forma:

$$POD(a) = 1 - F\left(\frac{\ln(\hat{a}_{th}) - (\alpha_1 + \beta_1 \cdot \ln(a))}{\sigma_\gamma}\right) = 1 - F\left(\frac{\ln(\hat{a}_{th}) - \mu(a)}{\sigma_\gamma}\right)$$

donde F es la función de distribución acumulada continua (CFD, Cumulative Distribution Function) o simplemente función de distribución, la cual se explicará más adelante en el ANEXO B TERMINOLOGÍA ESTADÍSTICA Y CÁLCULO DE PARÁMETROS ESTADÍSTICOS. Es importante resaltar que el término  $(\ln(\hat{a}_{th}) - \mu(a)) / (\sigma_\gamma)$  es el valor normalizado para poder calcular la probabilidad de detección según una distribución normal estándar.

Finalmente se obtendrán 6 POD's. Esto es, una gráfica con una POD para cada paquete de energía y para frecuencia.

Como la naturaleza de los cálculos no representa ninguna dificultad ni se necesita ningún programa especial, estos se realizarán con Microsoft Excel debido a que este software dispone de funciones de cálculo adecuadas a estas necesidades.

## 5. RESULTADOS

En este capítulo se mostrarán los resultados de los dos métodos aplicados a las energías para intentar con ellos obtener un método de detección de fallos en los ejes de ferrocarril.

### 5.1. RESULTADOS DE LA RED NEURONAL

A continuación se muestran los resultados obtenidos del entrenamiento de estas redes. Cabe destacar que en este caso no se hace distinción entre paquetes de energía sino que ambos se utilizan dentro de cada velocidad. Debido a que los resultados para los tres casos (20Hz, 40Hz y 60Hz) son idénticos se muestra el de uno de ellos (20Hz) a continuación.

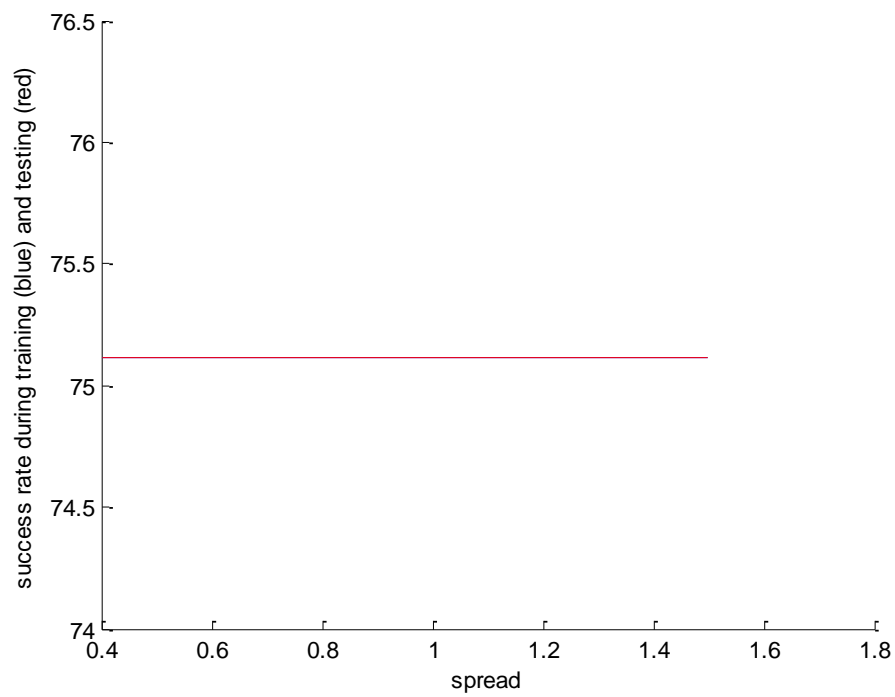


Ilustración 5.1 Tasa de éxito durante el entrenamiento frente propagación

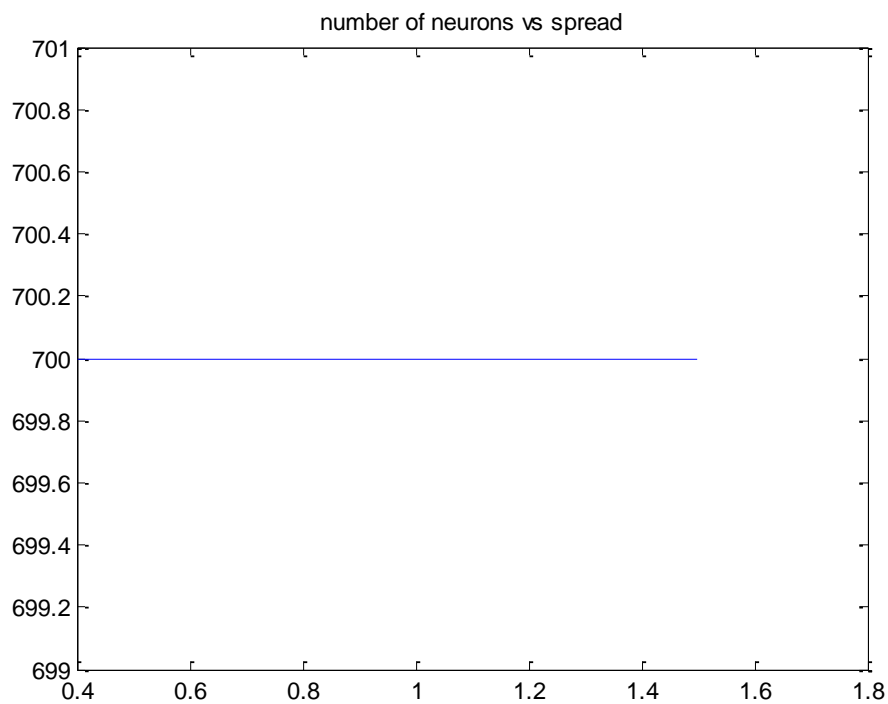


Ilustración 5.2 Número de neuronas frente propagación

Como se puede observar, las redes neuronales alcanzan siempre el criterio de parada, no porque lleguen al error cuadrático medio esperado, sino porque alcanzan el número de neuronas en la capa oculta que se ha impuesto, y siguen sin alcanzar una tasa de acierto razonable.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en la fase de validación de las redes (25% de los datos):

- Tasa de éxito para eje sano: 0%
- Tasa de éxito para eje con nivel de defecto 1: 100%
- Tasa de éxito para eje con nivel de defecto 2: 100%
- Tasa de éxito para eje con nivel de defecto 3: 100%
- Tasa de éxito para eje con nivel de defecto 5: 100%
- Tasa de éxito para eje con nivel de defecto 6: 100%
- Tasa de éxito para eje con nivel de defecto 7: 100%
- Tasa de éxito para eje con nivel de defecto 8: 100%
- Tasa de éxito para eje con nivel de defecto 9: 100%

Estas tasas de éxito son también idénticas en los tres casos (20Hz, 40Hz y 60Hz).

Con estos resultados se dibuja la curva de probabilidad de detección POD:

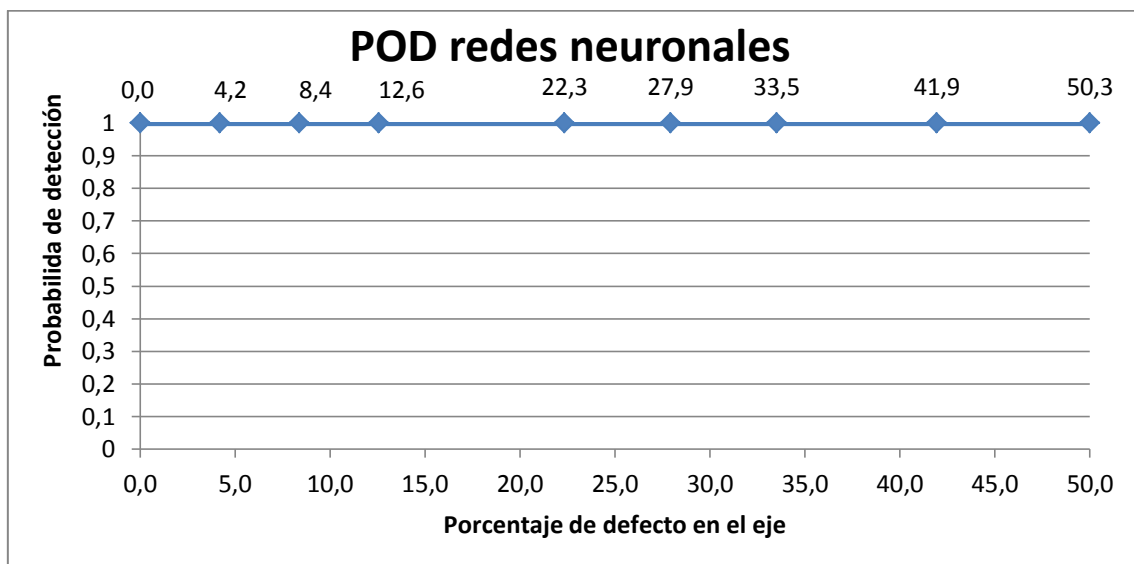


Ilustración 5.3 POD para redes neuronales

## 5.2. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DE LAS REDES NEURONALES

Como se puede ver en las tasas de acierto, las redes siempre detectan cuando existe defecto pero nunca detectan cuando el eje está sano. Estos resultados no son positivos desde el punto de vista de que no se puede predecir si un eje tiene o no fallo. No se puede diferenciar si un eje tiene o no defecto y, por lo tanto, mucho menos clasificar ese defecto.

## 5.3. RESULTADOS DEL METODO “SIGNAL RESPONSE” O SEÑAL DE RESPUESTA

De la misma manera que para redes neuronales se ha utilizado la toolbox de Matlab, para estos cálculos se ha utilizado Microsoft Excel.

Un paso previo a la aplicación de este método es, el cálculo de la media aritmética de las 100 matrices de energía para, de esta manera, minimizar los posibles errores y eliminar el posible ruido aleatorio que contengan las señales. Después de esto, se tienen vectores de diferente longitud en función del defecto ya que de cada defecto hay un número determinado de medidas.

Además, aquí se van a estudiar cada uno de los paquetes de energía por separado. Esto es, como cada velocidad tiene dos paquetes de energía, al final se obtendrán 6 curvas POD y así se podrá evaluar si un paquete es mejor que otro. Las tablas con todos los paquetes de energías finales se encuentran en el ANEXO C TABLAS CON LOS PAQUETES DE LAS ENERGÍAS.

El punto crítico para que las curvas POD sean un buen sistema de clasificación son los valores umbral. Si valor umbral está bien escogido y los datos son



suficientemente buenos, se deberían de ver resultados similares a los que se ven en la Ilustración 4.6 Representación ideal del POD vs real [22].

Por lo tanto, el criterio seguido para escoger los valores umbrales ( $\hat{a}_{th}$ ) para cada velocidad y paquete de energía es el siguiente: se han elegido los valores de tal manera que deje por debajo las energías del eje sano para poder así diferenciar estas de las de los ejes con defecto. Esto maximiza la probabilidad de detectar el fallo cuando este exista y según aumente el defecto y minimiza la probabilidad de detectar fallo en ejes sanos sin defectos. En otras palabras, se busca un valor capaz de separar lo mejor posible las energías del eje sano de las energías de los ejes con defectos. Cuanto mejor diferencie el valor umbral entre eje sano y con defecto mejor resultará la clasificación de defectos.

Para determinar el valor final se hacen pruebas con diferentes valores y se analizan las curvas POD. Este valor se ajusta por prueba y error. Tras las pruebas se determinan los valores que se muestran en la siguiente tabla:

Velocidades	20Hz		40Hz		60Hz	
Paquete	14	16	27	31	17	18
$\hat{a}_{th}$	0,01576	0,0176	0,11304	0,18268	1,5295	0,59750

Tabla 5.1 Tabla con los valores umbrales de detección  $\hat{a}_{th}$ .

A continuación se muestran las tablas con los cálculos necesarios poder hallar la probabilidad de detección. En dichas tablas aparecen tantas columnas como defectos hay. Estos cálculos vienen explicados en el apartado 4.2.1.

Para 20Hz, paquete 14.

Media de los logaritmos de las energías, $\mu$ .								
-3,4437	-4,10464	-4,1763	-4,0651	-4,09168	-4,04581	-4,03809	-3,99815	-3,89301
Desviación típica de los logaritmos de las energías, $\sigma$ .								
0,83807	0,17094	0,07347	0,08467	0,08737	0,0686	0,06631	0,07752	0,20316
Logaritmo del valor umbral de la energía, $\ln(\hat{a}_{th})$ .								
-4.15	-4.15	-4.15	-4.15	-4.15	-4.15	-4.15	-4.15	-4.15
Valor normalizado del logaritmo del valor umbral								
-0,8426	-0,2653	0,3580	-1,0021	-0,6673	-1,5170	-1,6875	-1,9584	-1,2649
POD, distribución normal estándar acumulada.								
0,8003	0,6046	0,3602	0,8419	0,7477	0,9354	0,9542	0,9749	0,8970

Tabla 5.2 Tabla con los resultados para 20Hz, paquete 14.

Para 20Hz, paquete 16.

Media de los logaritmos de las energías, $\mu$ .								
-3,43033	-3,95973	-4,09059	-3,93559	-3,95942	-3,90490	-3,93373	-3,87165	-3,72961
Desviación típica de los logaritmos de las energías, $\sigma$ .								
0,66474	0,1753	0,15370	0,07199	0,07898	0,06514	0,13748	0,08692	0,16261
Logaritmo del valor umbral de la energía, $\ln(\hat{a}_{th})$ .								
-4,035	-4,035	-4,035	-4,035	-4,035	-4,035	-4,035	-4,035	-4,035
Valor normalizado del logaritmo del valor umbral								
-0,9096	-0,4293	0,3617	-1,3807	-0,9567	-1,9971	-0,7366	-1,8792	-1,8780
POD, distribución normal estándar acumulada								
0,8185	0,6662	0,3588	0,9163	0,8307	0,9771	0,7693	0,9699	0,9698

Tabla 5.3 Tabla con los resultados para 20Hz, paquete 16.

Para 40Hz, paquete 27.

Media de los logaritmos de las energías, $\mu$ .								
-2,8065	-2,80715	-2,61643	-1,36850	-1,7898	-1,30019	-1,5758	-1,68275	-1,08957
Desviación típica de los logaritmos de las energías, $\sigma$ .								
0,39445	0,44339	0,61738	0,32629	0,12928	0,1898	0,18585	0,24166	0,62554
Logaritmo del valor umbral de la energía, $\ln(\hat{a}_{th})$ .								
-2,18	-2,18	-2,18	-2,18	-2,18	-2,18	-2,18	-2,18	-2,18
Valor normalizado del logaritmo del valor umbral								
1,5885	1,4144	0,7069	-2,4870	-3,0177	-4,6349	-3,2509	-2,0575	-1,7432
POD, distribución normal estándar acumulada								
0,0561	0,0786	0,2398	0,9936	0,9987	1,0000	0,9994	0,9802	0,9593

Tabla 5.4 Tabla con los resultados para 40Hz, paquete 27.

Para 40Hz, paquete 31.

Media de los logaritmos de las energías, $\mu$ .								
-2,18883	-2,1914	-2,15136	-1,24398	-1,4694	-1,06813	-1,27640	-1,3507	-0,86405
Desviación típica de los logaritmos de las energías, $\sigma$ .								
0,336695	0,2935	0,676628	0,297665	0,096248	0,150899	0,150067	0,18520	0,507680
Logaritmo del valor umbral de la energía, $\ln(\hat{a}_{th})$ .								
-1,7	-1,7	-1,7	-1,7	-1,7	-1,7	-1,7	-1,7	-1,7
Valor normalizado del logaritmo del valor umbral								
1,4519	1,6740	0,6671	-1,5320	-2,3955	-4,1874	-2,8227	-1,8858	-1,6466
POD, distribución normal estándar acumulada								
0,0733	0,0471	0,2524	0,9372	0,9917	1,0000	0,9976	0,9703	0,9502

Tabla 5.5 Tabla con los resultados para 40Hz, paquete 31.

Para 60Hz, paquete 17.

Media de los logaritmos de las energías, $\mu$ .								
0,04438	0,21108	0,3703	0,75095	0,77498	1,17972	0,8517	0,88748	1,36201
Desviación típica de los logaritmos de las energías, $\sigma$ .								
0,22098	0,1789	0,07965	0,10589	0,09728	0,12911	0,17734	0,11935	0,22876
Logaritmo del valor umbral de la energía, $\ln(\hat{a}_{th})$ .								
0,425	0,425	0,425	0,425	0,425	0,425	0,425	0,425	0,425
Valor normalizado del logaritmo del valor umbral								
1,7223	1,1956	0,6865	-3,0780	-3,5976	-5,8455	-2,4063	-3,8748	-4,0959
POD, distribución normal estándar acumulada								
0,0425	0,1159	0,2462	0,9990	0,9998	1,0000	0,9919	0,9999	1,0000

Tabla 5.6 Tabla con los resultados para 60Hz, paquete 17.

Para 60Hz, paquete 18.

Media de los logaritmos de las energías, $\mu$ .								
-1,04029	-0,93285	-0,91431	-0,20223	-0,12013	0,54472	0,14884	0,1839	0,8735
Desviación típica de los logaritmos de las energías, $\sigma$ .								
0,41248	0,32518	0,16704	0,20537	0,10507	0,21516	0,17253	0,221	0,29750
Logaritmo del valor umbral de la energía, $\ln(\hat{a}_{th})$ .								
-0,515	-0,515	-0,515	-0,515	-0,515	-0,515	-0,515	-0,515	-0,515
Valor normalizado del logaritmo del valor umbral								
1,2735	1,2850	2,3905	-1,5229	-3,7579	-4,9251	-3,8476	-3,1512	-4,6672
POD, distribución normal estándar acumulada								
0,1014	0,0994	0,0084	0,9361	0,9999	1,0000	0,9999	0,9992	1,0000

Tabla 5.7 Tabla con los resultados para 60Hz, paquete 18.

Por último se muestran las 6 gráficos con las curvas POD's:

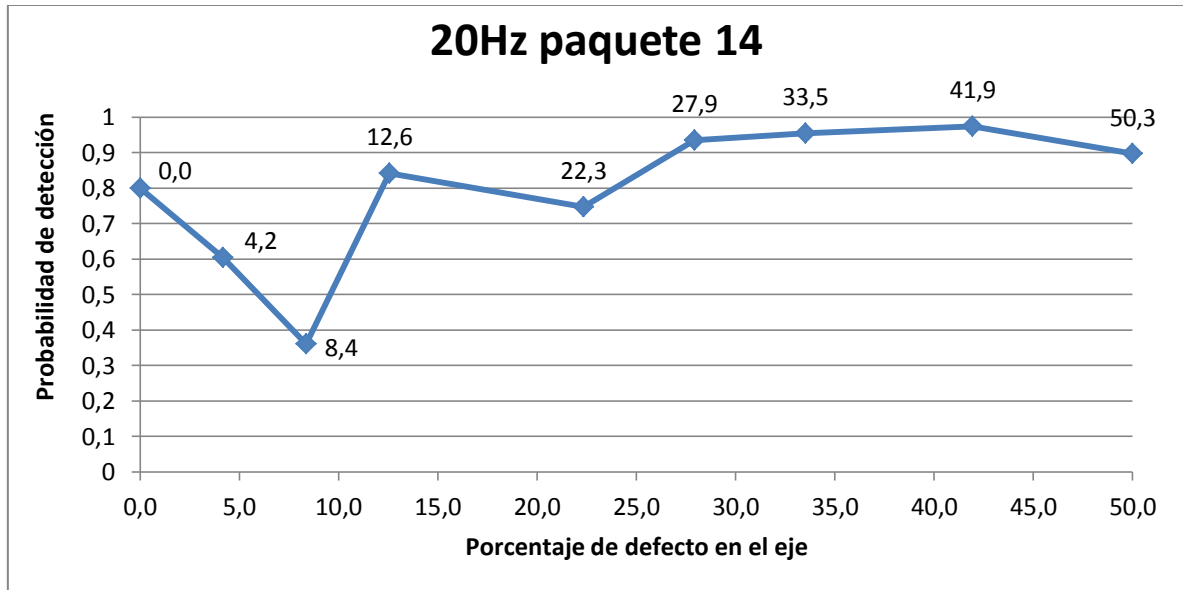


Ilustración 5.4 POD para 20Hz paquete 14

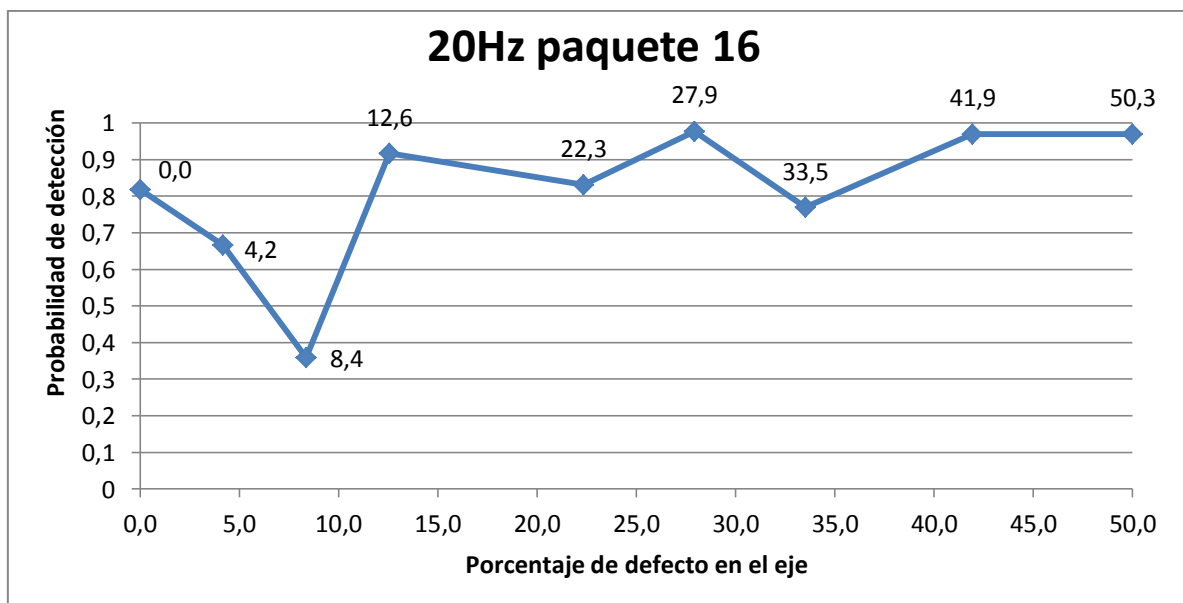


Ilustración 5.5 POD para 20Hz paquete 16

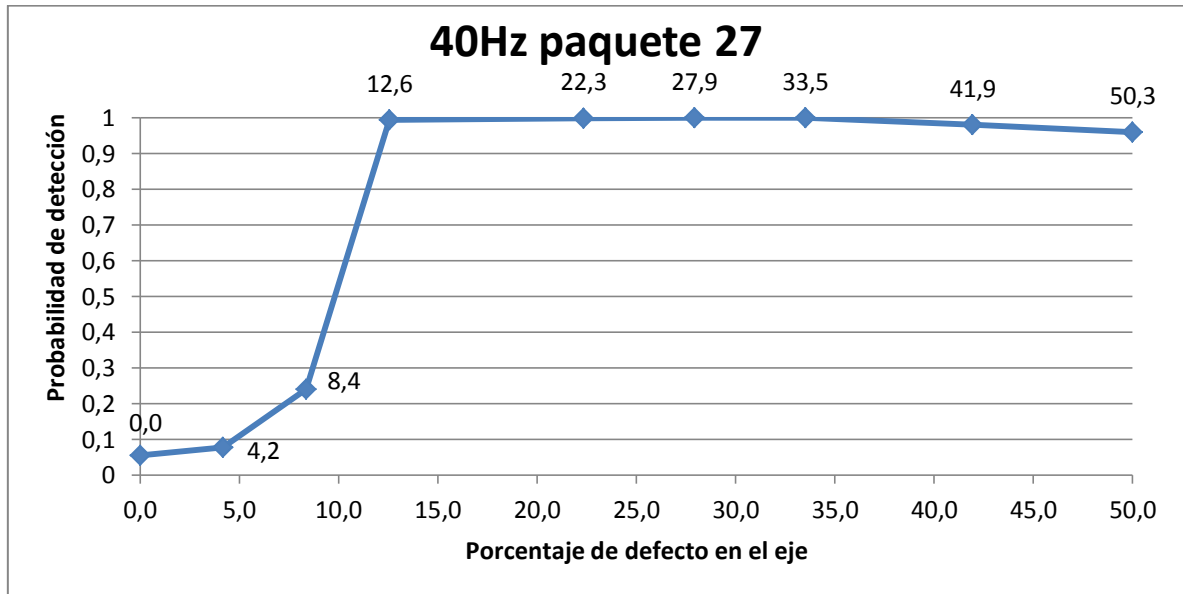


Ilustración 5.6 POD para 40Hz paquete 27

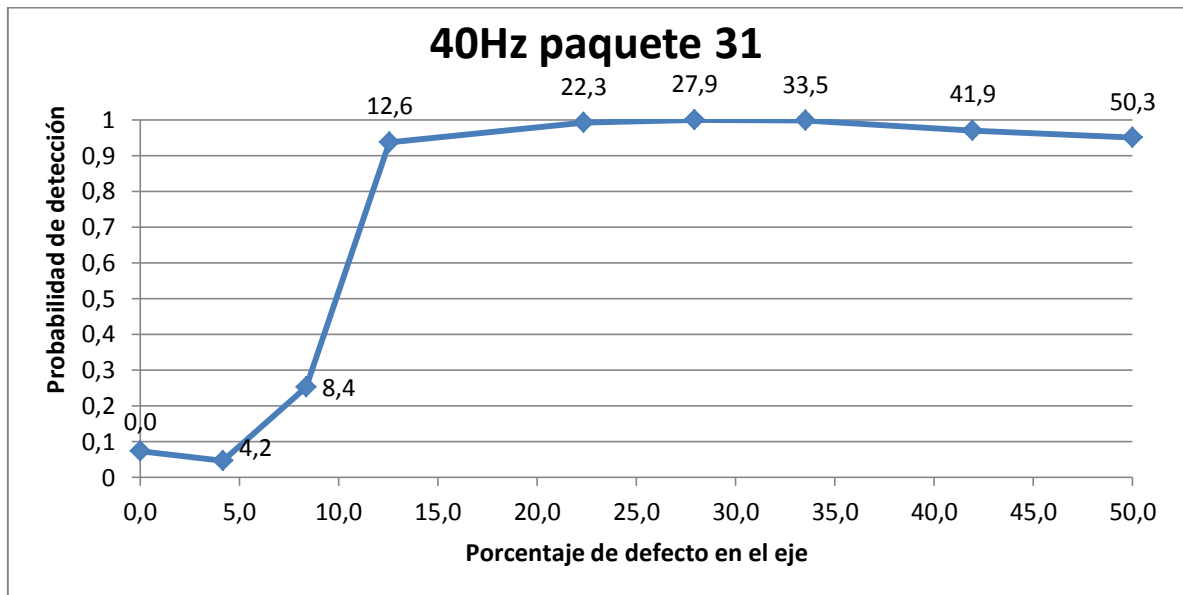


Ilustración 5.7 POD para 40Hz paquete 31

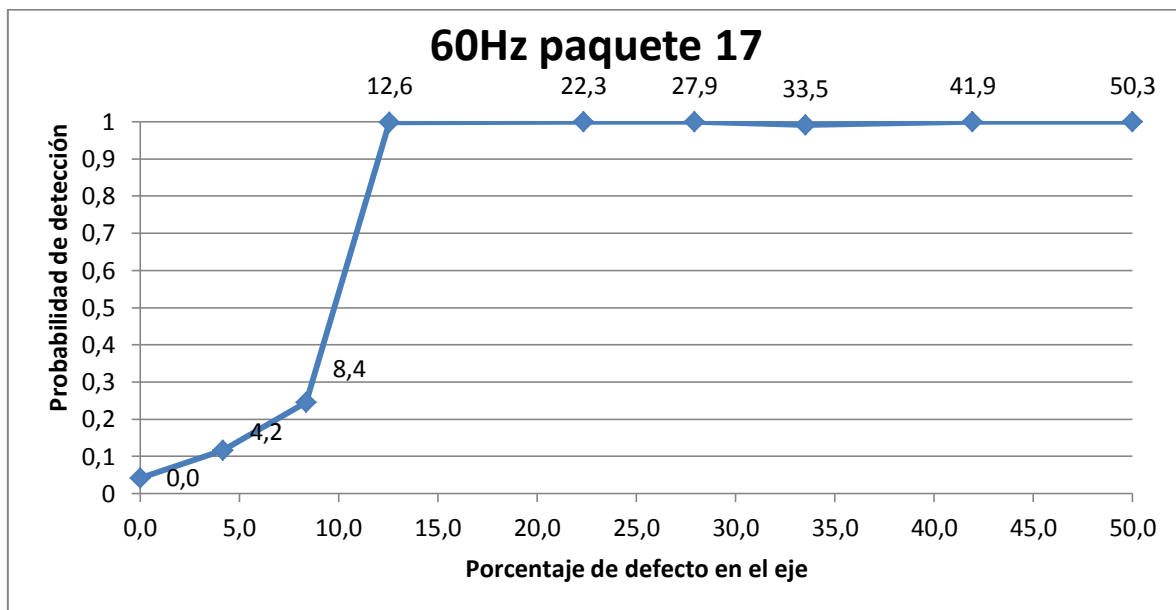


Ilustración 5.8 POD para 60Hz paquete 17

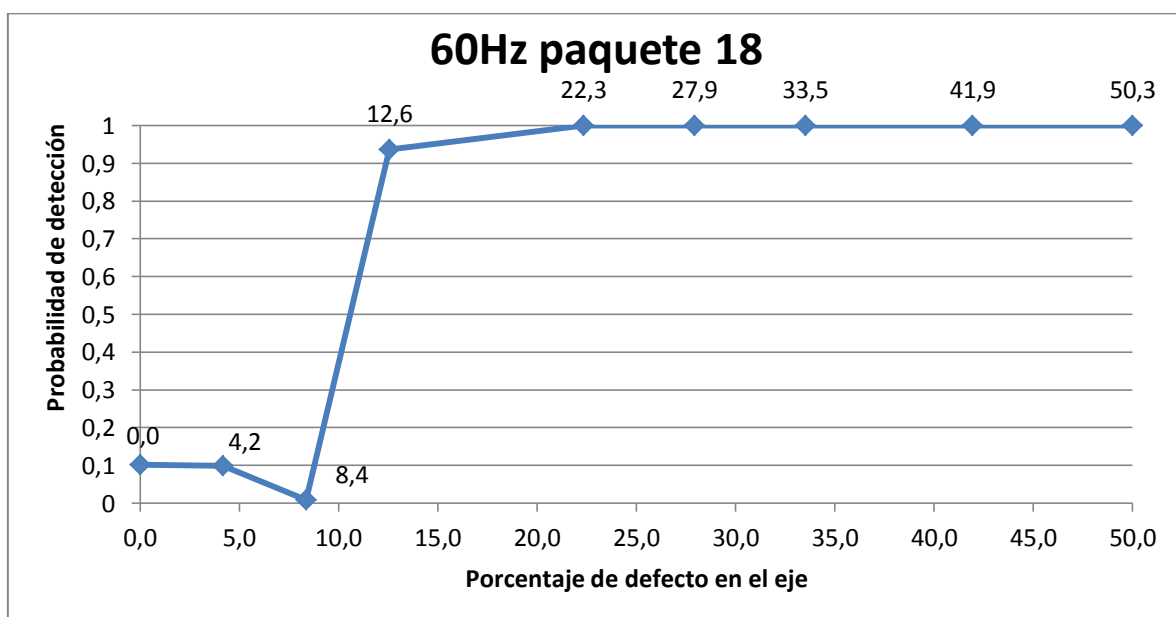


Ilustración 5.9 POD para 60Hz paquete 18

#### 5.4. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DEL METODO SEÑAL DE RESPUESTA O “SIGNAL RESPONSE”.

En este apartado se analizarán los resultados según la velocidad y según el paquete de energía. Al final se determinarán cual o cuales representan la mejor combinación velocidad/paquete de cara a su futura aplicación.

- Para 20Hz: Como se puede observar, no se puede discernir correctamente entre si hay o no hay fallo en el eje ya que las probabilidades de detección para el eje sano y para pequeños defectos son muy altas.

En cuanto a las diferencias entre paquetes, no se aprecia ninguna que pudiera resultar importante ya que en ambos casos no hay resultados positivos.

En ninguno de los dos casos se llega a una detección cercana al 100% de probabilidad.

- Para 40Hz: En este caso ambos paquetes muestran una muy baja probabilidad de detección para eje sano y se ve que esta probabilidad de detección aumenta según aumenta el defecto llegando a probabilidades cercanas a la unidad. Esto es deseable porque este es el comportamiento que se espera de estas curvas.

En cuanto a las diferencias entre paquetes, el paquete 27 alcanza mayores probabilidades de detección a igualdad de porcentaje de defecto, siendo la diferencia de un 10% aproximadamente. Esto quiere decir que este paquete discierne mejor si hay o no defecto con el mismo porcentaje de defecto. Una consecuencia de esto es que, se necesita menos defecto en el eje para que se detecte el fallo en el mismo; lo cual es un punto importante y deseable a la hora del mantenimiento ya que el fallo es detectado antes y con un riesgo mucho menor. También es notificable que en los casos del 41.9% y 50.3% de defecto se reduzca un poco la probabilidad de detección con respecto a los defectos inmediatamente anterior.



En el caso del paquete 27 en el defecto 3 que corresponde con el 12.6% de defecto, este es detectado con una probabilidad cercana al 100%. Para el caso del paquete 31 es en el defecto 5 o 22.3%

- Para 60Hz: para esta velocidad de giro también se observa lo mismo que en el caso inmediatamente anterior pero con diferencias importantes entre paquetes que se comentarán a continuación. La diferencia entre esta velocidad y la anterior reside en que en el caso de 40Hz la probabilidad de detección es menor en los defectos pequeños que en 60Hz y además en 60Hz según se aumenta el defecto la probabilidad de detección supera a la de 40Hz. El caso preferible es el de esta velocidad.

También es importante señalar que en este caso para defectos altos 41.9% y 50.3% la probabilidad de detección no desciende como en el caso de 40Hz sino que se mantiene. Esto es deseable ya que es como tiene que ser y por lo tanto frente al caso de 40Hz es mejor.

En el caso del paquete 18, se observa como para el defecto 2, 8.4% de defecto, se produce un descenso brusco de la probabilidad de detección. Esto puede ser debido a varios datos atípicos por golpes cerca de la mesa de ensayo a la hora de medir las vibraciones o a ruido en la señal a la hora de medir las vibraciones como por ejemplo prácticas en el laboratorio de ensaño con mucha gente.

Relativo a los paquetes, de la misma manera que en el caso de 40Hz aquí también hay diferencias entre paquetes y también es la misma diferencia entre ellos aunque más acusada. Esto es, en el caso del paquete 17 el defecto del 12.6% del eje se detecta prácticamente siempre mientras que en el paquete 18 para ese mismo defecto la probabilidad es de algo más de un 90%. Igual que antes, una diferencia de casi un 10%.

En este caso como en el de 40Hz, el defecto 3 para el paquete 17 es el primero que se detecta al 100% y en el caso del paquete 18 es el defecto 5.

Finalmente, después de analizar las 6 combinaciones velocidad/paquete se considera que las más adecuadas de cara a una posterior utilización son la de 40Hz/paquete 27 y 60Hz/paquete 17 y de estas dos la mejor opción es la de 60Hz/paquete 17. Las razones de esta elección son las que se explican en los párrafos anteriores.

La conclusión relativa a la velocidad de giro del eje que se puede obtener a la vista de estos resultados es que a mayor velocidad de giro del eje mejor se detectarán los fallos.

## **6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS**

En las siguientes líneas se presentan las conclusiones finales a las que se llega después del desarrollo de este proyecto:

- La obtención de las señales de vibración de los ejes ha sido satisfactoria.
- Se ha podido llevar a cabo la descomposición Wavelet Packet con nivel de descomposición 9 y se han hallado sus energías de manera satisfactoria.
- Los resultados obtenidos de la aplicación de redes neuronales no son útiles de cara a la detección de fallos en ejes con los patrones de entrada de los que se disponen.
- La aplicación del método “Signal Response” o Señal de Respuesta para calcular las curvas POD para la evaluación de las energías ha sido exitosa.

- Los resultados obtenidos de la aplicación del método de Señal de Respuesta son satisfactorios.
- Mediante el método Señal de Respuesta se ha determinado una velocidad óptima para la detección de defectos; siendo esta 60Hz paquete 17.
- A pesar de no poder obtenerse información del eje con el defecto 4, es decir del 16.7% del eje fisurado, se ha podido llevar a cabo el resto del proyecto sin verse el mismo perjudicado.
- El único método que funciona es el de Señal de Respuesta y la redes neuronales no han funcionado para este caso concreto.
- En este estudio se ha comprobado que según aumenta la velocidad de giro, los defectos se detectan más fácilmente según la técnica utilizada en este trabajo, es decir, la fiabilidad del método es mayor, según muestran las curvas POD.
- El defecto mínimo que se ha detectado con gran fiabilidad es el nivel 3 (aproximadamente el 8.4% del diámetro), que alcanza una probabilidad de detección de cercana al 100% para el paquete 17.
- El defecto máximo que podría no detectarse es el 2 que se corresponde al 4.2% del eje fisurado.

#### Futuros trabajos:

- Realizar un estudio del ruido en las señales de 20Hz y 40Hz para intentar mejorar los resultados.
- Repetir el estudio con más ejes para comprobar que las conclusiones alcanzadas se siguen cumpliendo.
- Analizar otras bandas de frecuencia para ver si se pueden mejorar las curvas POD.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] “La transformada de Wavelet en el análisis de señales. Aplicación a vibraciones en sistemas rotativos”. Proyecto Fin de Carrera. Mario Pasamontes García. UC3M.
  
- [2] “Procesamiento digital de señales vibratorias mediante las Transformada Wavelet Packets”. Proyecto Fin de Carrera. Eduardo Romero Mariscal. UC3M.
  
- [3] “Reducción de ruido en imágenes planares de Medicina Nuclear con empleo de la Transformada Wavelet”. Ing. María del Carmen Casas Cardoso et al. Alasbimn

- [4] “Caracterización de aisladores eléctricos sometidos a descargas parciales usando la transformada Wavelet”. José L. Paredes<sup>1</sup>, Ender Luzardo<sup>2</sup> y Hildemaro Briceño. Escuela de Ingeniería Eléctrica. Universidad de Los Andes, Mérida – Venezuela
- [5] Trabajo Dirigido: “Máquina de simulación de fallos”. Jaime Salvadó Ruiz, Marcos Rodríguez Millán y Álvaro Vaz-Romero Santero. Departamento Ingeniería Mecánica UC3M.
- [6] Informe A2-T2.4 Proyector Rankine: “Metodología de ensayos”. Grupo MaqLab, UC3M.
- [7] Calibration Chart for Charge Accelerometer Type 4383. Brüel & Kjaer.
- [8] Product Data NEXUS Conditioning Amplifier 2690 – 2693 Brüel & Kjaer.
- [9] “Cálculo, construcción y ensayo de máquinas I”. Juan Carlos García Prada - José Ignacio Pedrero Moya
- [10] “Multianálisis frecuencial y estadístico de la vibración emitida por un elemento mecánico con fallo bajo diferentes estados de carga”. Proyecto Fin de Carrera. Gustavo Adolfo Casasola Paredes. UC3M.
- [11] “Aplicación del método Shock Pulse para detección de defectos en rodamientos”. Proyecto Fin de Carrera. Jaime González Rodríguez. UC3M.
- [12] “Análisis de señales mediante STFT y Wavelet. Aplicación a defectología en rodamientos”. Proyecto Fin de Carrera. Miguel Zamorano Castaño. UC3M.

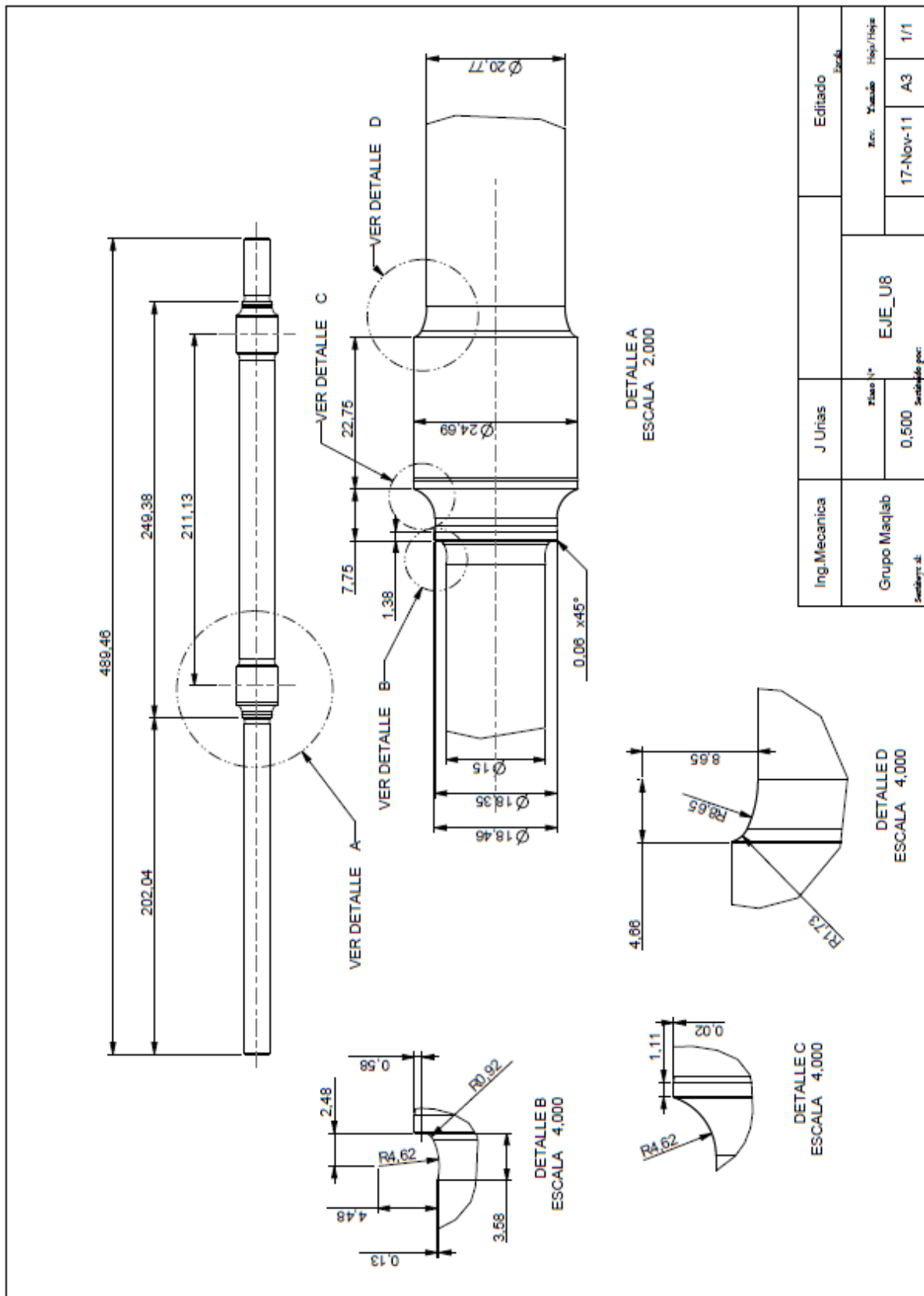
- 
- [13] “Herramienta para la adquisición, procesamiento y monitorización de señales. Detección de fallos en ejes y rodamientos mecánicos”. Proyecto Fin de Carrera. Javier Romero Carrasco. UC3M.
- [14]” Ripples in Mathematics, The Discrete Wavelet Transform”. A.Jensen y A. Ia Cour-Harbo.
- [15] “Applied Vibration Analysis. Training Manual” - SpectraQuest, Inc. Richmond, Virginia.
- [16] “Neural Network Toolbox. User’s Guide”. Mathworks. Matlab.
- [17] “Análisis y simulación de vibraciones en engranajes: ADEVI 4.5”. Proyecto Fin de Carrera. Jaime Jiménez Perez. UC3M.
- [18] [http://members.tripod.com/jesus\\_alfonso\\_lopez/RnaIntro.html](http://members.tripod.com/jesus_alfonso_lopez/RnaIntro.html)
- [19] “Desarrollo de una interfaz gráfica de redes neuronales usando Matlab”. Proyecto Fin de Carrera. Alfonso Moreno Rodriguez. UC3M.
- [20] “Redes neuronales artificiales” Antonio J. Serrano, Emilio Soria, José D. Martín. Open CourseWare Universidad de Valencia.
- [21] “Structural reliability, Assessment of railway axles” S. Cantini, S. Beretta (Editors). LRSTechno.
- [22] “Cracked Rotors: A Survey on Static and Dynamic Behaviour Including Modelling and Diagnosis”. Nicoló Bachschmid, Paolo Pennacchi, Ezio Tanzi.
- [23] “Probability of Detection (PoD) curves. Derivation, applications and limitations” Prepared by Jacobi Consulting Limited for the Health and Safety Executive 2006.
-

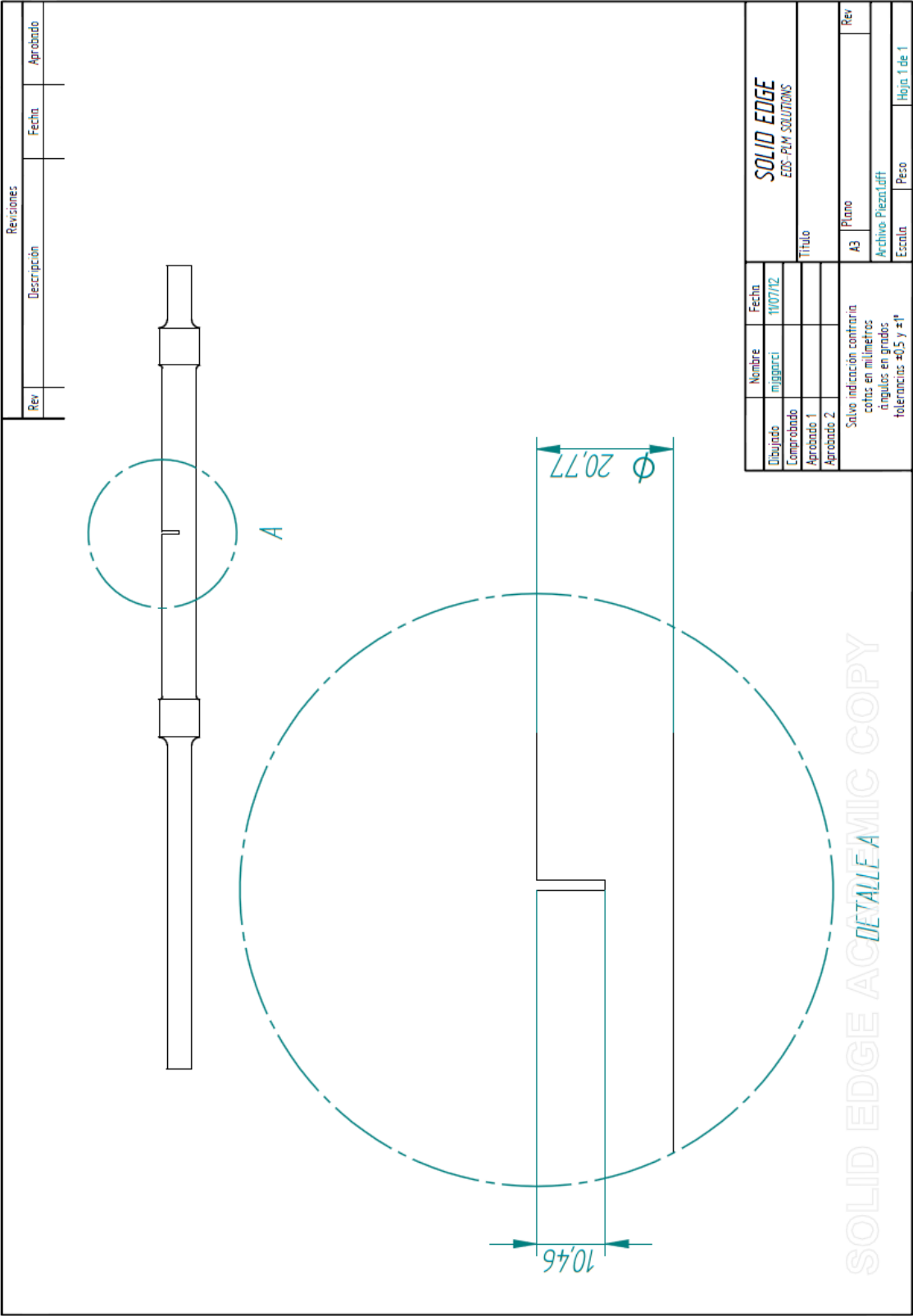
- [24] “A NEW APPROACH FOR THE DEFINITION OF “PROBABILITY OF DETECTION” CURVES”.Michele CARBONI<sup>1</sup>, Stefano CANTINI.Dept. Mechanical Engineering, Politecnico di Milano, Milano, Italy.



## **ANEXOS**

# ANEXO A DIMENSIONES DEL EJE





## ANEXO B TERMINOLOGÍA ESTADÍSTICA Y CÁLCULO DE PARÁMETROS ESTADÍSTICOS

### INTERVALO DE CONFIANZA.

La naturaleza estadística de la evaluación no destructiva (NDE, Non Destructive Evaluation) llevaba asociada un intervalo de confianza de las funciones  $POD(a)$ . Como ejemplo, se muestra en la siguiente figura la comparación entre una curva  $POD(a)$  al 50% de confianza junto con la del 95% de confianza [22].

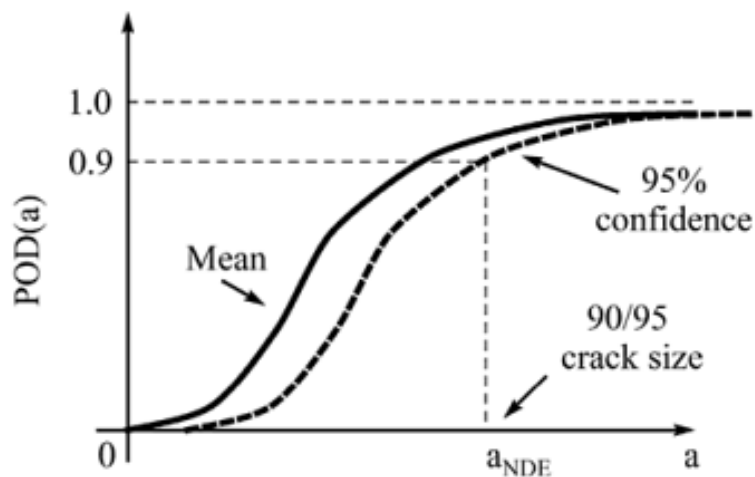


Ilustración 0.1 Niveles de confianza para curvas POD

En la práctica, una combinación de POD y un bajo límite de confianza suele ser de 90% y 95%, respectivamente. Para cada acierto/error y de señal de respuesta, es necesario tener un mínimo de muestras de 29 defectos en cada intervalo de ancho de defecto. Esto puede ser interpretado como 29 especímenes de defecto con un defecto en cada espécimen. Esto significa que si se usan 6 intervalos de ancho de defecto, se necesitarían un mínimo de 174 especímenes de defecto, un coste considerable para producir una curva POD experimental. Con semejante número de defectos, los

requerimientos para calcular los parámetros de la función  $POD(a)$  se satisfacen fácilmente [23].

## MODELO LOG – NORMAL

[23] Sabiendo que:

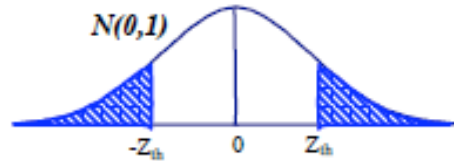
$$\ln(\hat{a}) = \alpha_1 + \beta_1 \cdot \ln(a) + \gamma$$

entonces se puede decir que  $\ln(\hat{a})$  está normalmente distribuido con media  $\mu(a) = \alpha_1 + \beta_1 \cdot \ln(a)$  y desviación estándar constante  $\sigma_\gamma$ . El parámetro estándar  $Z \sim N(0,1)$  viene dado por:

$$Z = \left( \frac{\ln(\hat{a}) - (\alpha_1 + \beta_1 \cdot \ln(a))}{\sigma_\gamma} \right)$$

y el área que se quiere está dada por la zona derecha de la región sombreada.

Como  $P(Z \leq Z_{th}) = F(Z_{th}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Z_{th}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$



Por tanto  $P(Z > Z_{th}) = 1 - F(Z_{th})$

Y de aquí que:

$$POD(a) = 1 - F\left(\frac{\ln(\hat{a}_{th}) - (\alpha_1 + \beta_1 \cdot \ln(a))}{\sigma_\gamma}\right)$$

pero  $POD(a) = F(-Z_{th})$

por tanto  $POD(a) = F\left(\frac{(\alpha_1 + \beta_1 \cdot \ln(a)) - \ln(\hat{a}_{th})}{\sigma_\gamma}\right)$

por tanto  $POD(a) = F\left(\frac{\ln(a) - ((\ln(\hat{a}_{th}) - \alpha_1) / \beta_1)}{(\sigma_\gamma / \beta_1)}\right)$

la cual es la distribución acumulada log – normal con media  $\mu$  y desviación estándar  $\sigma$  dado por:

$$\mu(a) = \frac{\ln(\hat{a}_{th}) - \alpha_1}{\beta_1}$$

$$\sigma = \frac{\sigma_Y}{\beta_1}$$

## FUNCIÓN DENSIDAD DE PROBABILIDAD. CASO CONTINUO.

[23] Siendo una variable aleatoria continua  $X$  que puede tener cualquier valor en un intervalo particular, es necesario definir una función continua que describa la probabilidad de distribución de  $X$ . Esta función se llama Función Continua de Densidad de Probabilidad  $f(x)$  y normalmente se define en el intervalo  $-\infty < x < +\infty$ . La variable aleatoria  $X$  se define en términos de  $f(x)$  y tiene las siguientes propiedades:

$$P(-\infty < X < +\infty) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)dx = 1 \quad (f(x) \geq 0)$$

Esto es, la probabilidad de  $X$ , perteneciente al rango completo de posibles valores, que corresponde al área completa bajo  $f(x)$ . La ecuación anterior es análoga a la siguiente:

$$P(a < X < b) = \int_a^b f(x)dx$$

Esta ecuación representa la probabilidad de  $X$ , que pertenece al intervalo  $(a,b)$ , que corresponde al área bajo la curva  $f(x)$  en dicho intervalo.

De esta última ecuación, la probabilidad de que la variable aleatoria continua  $X$  perteneciente al intervalo  $x$  y  $x+dx$  (donde  $dx$  es un intervalo finito y pequeño) es  $f(x)dx$ . Con una selección apropiada de  $dx$ , esta área bajo  $f(x)$  puede ser usada para

aproximar la posibilidad de que  $X$  asuma un valor particular en una distribución discreta, esto es:

$$f(x) \cdot dx = P(X = x)$$

La Función de Distribución Acumulada  $F(x)$  está dada por:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(t)dt = P(X \leq x) \quad (-\infty < x < +\infty)$$

Esta última ecuación representa el área bajo la curva  $f(x)$  hasta e incluyendo a  $x$ .

## ANEXO C TABLAS CON LOS PAQUETES DE LAS ENERGÍAS

### 20Hz Paquete 14.

Defecto 0	Defecto 1	Defecto 2	Defecto 3	Defecto 5	Defecto 6	Defecto 7	Defecto 8	Defecto 9
0.01490730	0.0155117	0.0142190	0.0198914	0.0161167	0.0187298	0.0179896	0.0178805	0.0205073
0.01330890	0.0140614	0.0144607	0.0173227	0.0152741	0.0179665	0.0157807	0.0168715	0.0201689
0.06874905	0.0177188	0.0154998	0.0190651	0.0147198	0.0158244	0.0195326	0.0177629	0.0181259
0.07026174	0.0171056	0.0139171	0.0160309	0.0144814	0.0176004	0.0202777	0.0178962	0.0175676
0.06490987	0.0135603	0.0151531	0.0158781	0.0158776	0.0163137	0.0179086	0.0173977	0.0176059
0.07234302	0.0124703	0.0153269	0.0146768	0.0150385	0.0166739	0.0167089	0.0172037	0.0185808
0.07234302	0.0145141	0.0151825	0.0160355	0.0177460	0.0191200	0.0183477	0.0174469	0.0192564
0.07234302	0.0133214	0.0132860	0.0204776	0.0192746	0.0180386	0.0175358	0.0173468	0.0186483
0.07234302	0.0173633	0.0153676	0.0163186	0.0171619	0.0201453	0.0172870	0.0178356	0.0174344
0.07234302	0.0158332	0.0139415	0.0183064	0.0176328	0.0174480	0.0175843	0.0165718	0.0166949
0.08493019	0.0169854	0.0154165	0.0173094	0.0186072	0.0159802	0.0172678	0.0191297	0.0266224
0.08092974	0.0161145	0.0161605	0.0178804	0.0172202	0.0180257	0.0159542	0.01907	0.0192942
0.08597789	0.0183823	0.0170081	0.0169558	0.0171060	0.0167920	0.0166025	0.0185271	0.0273651
0.07663261	0.0151178	0.0148635	0.0170960	0.0157428	0.0184166	0.0172071	0.0177055	0.0206925
0.07672749	0.0166311	0.0148640	0.0173452	0.0164801	0.0159909	0.0185621	0.0200430	0.0380566
0.07168534	0.0156241	0.0144451	0.0164558	0.0163024	0.0181067	0.0181339	0.0200775	0.0203885
0.07517524	0.0164371	0.0177780	0.0157400	0.0177569	0.0181283		0.0224514	0.0190560
0.07222234	0.0165320	0.0164396	0.0171621	0.0193454	0.0163195		0.0200337	0.0190560
0.07274691	0.0165498	0.0154073						
0.07334587	0.0147088	0.0170842						
0.08322729	0.0177427	0.0150672						
0.08032826	0.0163498	0.0165972						
0.08846704	0.0148773	0.0165972						
0.08289973	0.0154351							
0.08328254	0.0161841							
0.07731663	0.0148466							
0.07596316	0.0401587							
0.08143155	0.0191022							
0.01498216	0.0144422							
0.01422435	0.0154544							
0.01289134	0.0158191							
0.01615451	0.0160056							
0.01541994	0.0168769							
0.01445488	0.0174110							
0.02158090	0.0187355							
0.01437704	0.0175482							
0.01278658	0.0192153							
0.01587267	0.0164538							
0.01486811	0.0159753							
0.01603203	0.0155930							
0.01281507	0.0173454							
0.01407604	0.0189509							
0.01305370								
0.01395189								
0.01369803								
0.01145288								
0.01309063								
0.01583607								
0.01389919								
0.01627487								
0.01295618								
0.01677623								
0.01658526								
0.01465843								
0.01673806								



## 20Hz Paquete 16.

Defecto 0	Defecto 1	Defecto 2	Defecto 3	Defecto 5	Defecto 6	Defecto 7	Defecto 8	Defecto 9
0.020893	0.0209978	0.0179835	0.0202134	0.0202083	0.0231510	0.0207195	0.0218780	0.0222519
0.0143561	0.0206873	0.0145261	0.0185286	0.0176235	0.0197588	0.0196518	0.0186991	0.0209249
0.0636356	0.02001	0.0165674	0.0207071	0.0169388	0.0214875	0.0230423	0.0232319	0.0222754
0.0565067	0.0158860	0.0151816	0.0169548	0.0160134	0.0201831	0.0206443	0.0198215	0.0191362
0.0562456	0.0177757	0.0192206	0.0207705	0.0202739	0.0189990	0.0230877	0.0216547	0.0228395
0.0581890	0.0123845	0.0152018	0.0209114	0.0187048	0.0195222	0.0187908	0.0212470	0.0200634
0.0581890	0.0189290	0.0185688	0.0189818	0.0192634	0.0207866	0.0217279	0.0195921	0.0228948
0.0581890	0.0138309	0.0146377	0.0211148	0.0194599	0.0195660	0.0191775	0.0202848	0.0198111
0.0581890	0.0220530	0.0175041	0.0196634	0.0206424	0.0204782	0.0142802	0.0188374	0.0235172
0.0581890	0.0187007	0.0147575	0.0207391	0.0180469	0.0186810	0.0153914	0.0197476	0.0221386
0.0768946	0.0191857	0.0184715	0.0182749	0.0203595	0.0178571	0.0213834	0.0196751	0.0280943
0.0699417	0.0179096	0.0187112	0.0187718	0.0193854	0.0200299	0.0166851	0.0223540	0.0263981
0.0658584	0.0258498	0.0165732	0.0186473	0.0177562	0.0222223	0.0217813	0.0189218	0.0310341
0.0653061	0.0170571	0.0166677	0.0221419	0.0189411	0.0206594	0.0190548	0.0220270	0.0243332
0.0695494	0.0190038	0.0143627	0.0178635	0.0200499	0.0209642	0.0213094	0.0200885	0.0364676
0.0631488	0.0162517	0.0100138	0.0205760	0.0181671	0.0197067	0.0190671	0.0264388	0.0267713
0.0599483	0.0174487	0.0185989	0.0179480	0.0213279	0.0208276		0.0215059	0.0243977
0.0604811	0.0186443	0.0178009	0.0196602	0.0211677	0.0184190		0.0202063	0.0243977
0.0597903	0.0245098	0.0175371						
0.0602881	0.0199427	0.0183572						
0.0732352	0.0247240	0.0169746						
0.0648103	0.0168655	0.0203019						
0.0697338	0.0181660	0.0203019						
0.0692444	0.0153033							
0.0729002	0.0184133							
0.0622646	0.0160223							
0.0617102	0.0284963							
0.0687956	0.0195417							
0.0194844	0.0156697							
0.0141211	0.0184929							
0.0141396	0.0160243							
0.0271622	0.0167563							
0.0222915	0.0212151							
0.0181204	0.0237452							
0.0177436	0.0280883							
0.0204379	0.0216138							
0.0143488	0.0195467							
0.0195251	0.0205980							
0.0151440	0.0202974							
0.0207723	0.0167601							
0.0145591	0.0216660							
0.0183551	0.0180547							
0.0145174								
0.0180316								
0.0141967								
0.0137044								
0.012782								
0.021106								
0.0158175								
0.0200310								
0.0151694								
0.0249142								
0.0230621								
0.0204158								
0.0172191								

## 40Hz Paquete 27.

Defecto 0	Defecto 1	Defecto 2	Defecto 3	Defecto 5	Defecto 6	Defecto 7	Defecto 8	Defecto 9
0.0371632	0.0571032	0.0603938	0.0974301	0.1791629	0.2293364	0.1981267	0.1644091	0.1415693
0.0483213	0.0359177	0.0696229	0.2855771	0.1713403	0.2279319	0.1996984	0.1158485	0.1886367
0.0708066	0.0391724	0.0682632	0.2215136	0.1827362	0.2578373	0.2331302	0.1211251	0.1750567
0.0795279	0.0385218	0.1005984	0.2393023	0.1616291	0.1906100	0.2262121	0.1417633	0.2441852
0.0787764	0.0385218	0.077868	0.2365925	0.1681279	0.2625324	0.2916372	0.1513142	0.1999118
0.0682213	0.0385218	0.092767	0.2763922	0.1681279	0.2653348	0.2492724	0.1395482	0.2338331
0.0682213	0.1081424	0.0863123	0.3594216	0.1391237	0.2266093	0.1474708	0.2300818	0.1966313
0.0682213	0.2221575	0.0573332	0.3613090	0.1848456	0.3166346	0.2256557	0.2707546	0.2560922
0.0682213	0.0511844	0.0814077	0.2580431	0.1986098	0.3448873	0.2261520	0.2197601	0.2274073
0.0682213	0.0787323	0.0846946	0.1571798	0.1338318	0.3228352	0.2480519	0.2025617	0.2400094
0.0716739	0.0464465	0.0635033	0.3299432	0.1772692	0.3715219	0.2314518	0.2101859	0.6372987
0.0656557	0.0571032	0.1044910	0.2706013	0.1898882	0.3696463	0.1772405	0.2087263	0.6177450
0.0659218	0.0571032	0.0637909	0.3441293	0.1892507	0.2596412	0.2030127	0.2000960	0.8266318
0.0636499	0.0571032	0.0722841	0.2417042	0.1686802	0.2967559	0.1778761	0.2234751	0.4609060
0.0579138	0.0470868	0.0053743	0.3164842	0.1320845	0.2881803	0.1736755	0.2212068	0.8633802
0.0632494	0.0461638	0.1032301	0.2990078	0.1383673	0.2974339	0.1540826	0.1778548	0.7430127
0.0696901	0.0482176	0.0940438	0.2206247	0.1774072	0.2141731		0.2210472	0.6398090
0.0658866	0.0461638	0.1274368			0.2468412		0.2143829	
0.0622089	0.0461994	0.0979977						
0.0704893	0.0360465	0.0940309						
0.0701594	0.0774262	0.0867119						
0.0803841	0.0706879	0.0867119						
0.0694073	0.0593291							
0.0670005	0.0582263							
0.0714402	0.0581746							
0.0676101	0.0612600							
0.0673132	0.0665342							
0.0756712	0.0614086							
0.0844964	0.0439544							
0.0511799	0.0580949							
0.0473024	0.0423118							
0.0441086	0.0506788							
0.0517463	0.0314353							
0.0558903	0.0341057							
0.0102147	0.1194471							
0.0492246	0.1442981							
0.0357626	0.0848191							
0.0486798	0.1009578							
0.0340043	0.0977326							
0.0562949	0.0952853							
0.0522873	0.1505949							
0.0413220								
0.0504966								
0.0647594								
0.0335528								
0.0786949								
0.0680657								
0.062138								
0.0742881								
0.0752931								
0.1486597								
0.0304740								
0.0512062								
0.1358696								
0.1358696								

## 40Hz Paquete 31.

Defecto 0	Defecto 1	Defecto 2	Defecto 3	Defecto 5	Defecto 6	Defecto 7	Defecto 8	Defecto 9
0.09497040	0.1073895	0.1117624	0.1247587	0.2373555	0.2899896	0.2604456	0.2423918	0.2165291
0.08757300	0.0859862	0.1198672	0.3050394	0.2242662	0.3092692	0.2751691	0.1840036	0.2710516
0.12000142	0.0834325	0.1245958	0.2522910	0.2521265	0.3282321	0.3203354	0.1768877	0.2561018
0.12386416	0.0768219	0.1506508	0.2876297	0.2352020	0.2628486	0.2929368	0.2154308	0.3358406
0.12921803	0.0768219	0.1299567	0.2770287	0.2311068	0.3333866	0.3639357	0.2281396	0.2808578
0.11478632	0.0768219	0.1436019	0.2962209	0.2311068	0.3578493	0.3192855	0.2029811	0.3064452
0.11478632	0.1538939	0.1442570	0.4078731	0.2111970	0.2993629	0.2108555	0.2998812	0.2648342
0.11478632	0.2738381	0.1055290	0.4232233	0.2421058	0.3663557	0.3021987	0.3305704	0.3042601
0.11478632	0.1065860	0.1405348	0.2922009	0.2564401	0.4110229	0.2939750	0.3058663	0.3084366
0.11478632	0.1319048	0.1318378	0.1801173	0.1954252	0.3633729	0.3128898	0.2911779	0.3262990
0.15088315	0.0927810	0.1190446	0.3428385	0.2475740	0.4570755	0.3134302	0.2773719	0.6859045
0.14332567	0.111809	0.1583985	0.2938284	0.2397048	0.4301390	0.2540820	0.2802956	0.6661738
0.12565309	0.111809	0.1135526	0.3904428	0.2598714	0.3111241	0.2866653	0.2853694	0.8807907
0.13009169	0.111809	0.1238344	0.2733159	0.2368622	0.3709561	0.2412511	0.2995866	0.5394175
0.11036405	0.1040063	0.0059172	0.3588062	0.1884493	0.3694843	0.2463637	0.2821339	0.9767966
0.11912333	0.0918819	0.1597729	0.3246774	0.1968742	0.3874205	0.2173817	0.2446387	0.8261614
0.12303062	0.0942844	0.1452585	0.2536909	0.2418842	0.2798664		0.2953794	0.6764540
0.11668055	0.0918819	0.1731039			0.3250436		0.2930230	
0.11310689	0.0915537	0.1413936						
0.13046758	0.0832383	0.1397404						
0.13272304	0.1264963	0.1299804						
0.13751086	0.1096043	0.1299804						
0.11389481	0.0943337							
0.11658372	0.0967622							
0.12587122	0.0952990							
0.12138487	0.1030691							
0.11705042	0.1216673							
0.12284638	0.1078060							
0.14926595	0.0972214							
0.10298169	0.1118745							
0.10781671	0.0908489							
0.11132803	0.1034141							
0.12148570	0.0873688							
0.09814792	0.0925380							
0.01605851	0.1787962							
0.09692179	0.2048733							
0.08098896	0.1436792							
0.09802913	0.1571097							
0.07440526	0.1578380							
0.09912770	0.1501017							
0.10023263	0.2134685							
0.08954190								
0.08976207								
0.11508022								
0.07162216								
0.12182843								
0.10640499								
0.11421525								
0.11909575								
0.12285720								
0.21434989								
0.10123411								
0.12403358								
0.20058519								
0.20058519								

## 60Hz Paquete 17.

Defecto 0	Defecto 1	Defecto 2	Defecto 3	Defecto 5	Defecto 6	Defecto 7	Defecto 8	Defecto 9
0.8801576	0.9499375	1.3944197	2.1138819	1.7950739	2.3901303	2.8292150	2.0990851	2.3610770
1.0515019	0.8179195	1.3914444	1.9403243	1.9038726	2.7591079	2.5484665	1.9783418	3.1505730
0.9434556	0.9382517	1.5335964	1.6490166	2.0116496	3.1919973	2.7573439	2.1700431	3.1418427
1.0041473	0.9414999	1.5781929	1.8324790	1.8858153	3.2684270	2.8366521	2.2231322	3.2599878
0.9931256	1.1248326	1.3865465	2.0016707	2.3012441	3.4539503	2.7831886	2.0689159	3.9382998
0.984495	1.0102508	1.365638	2.4819695	2.2482605	3.4408646	2.7864831	2.2221956	3.9194598
0.9606403	1.2684403	1.5107939	2.3163059	2.0822056	2.9439621	2.1810443	2.4793045	3.6791308
0.9475614	1.2842353	1.3392501	2.3948275	2.2142709	3.0985790	2.4691741	2.6970730	4.0203052
0.9629882	1.1348689	1.3870678	1.9333829	2.3299040	3.5782302	1.6374999	2.5561940	3.2200479
0.9306009	1.2629828	1.4336328	2.1964201	2.4558875	3.5231534	1.5921979	2.6257830	4.5341324
0.8872521	1.2315798	1.3978191	2.2292714	2.5059516	3.6857789	2.4575207	2.7253051	4.9959036
0.8399165	1.2015879	1.4325902	2.3278261	2.2782750	4.0400445	2.2804138	2.8501582	5.0719638
0.8597130	1.2178346	1.3502942	2.1782335	2.2567450	3.5480508	2.1507840	2.7919328	5.3298929
0.9389581	1.1802112	1.3813016	2.2158637	2.2257438	3.4817436	2.1938718	2.8291981	4.7546637
1.0407894	1.2841126	1.2364729	2.1893677	2.0101548	3.2045891	2.1652988	2.2371620	4.5741281
1.1072167	1.3011979	1.2879567	2.0775413	2.1153504	2.8435106	2.3577371	2.5068361	
1.1652776	1.1065835	1.5424436		2.4417829			2.5076676	
1.1321231	1.1506691	1.6501766						
1.1887750	1.1973722	1.5892346						
1.1382319	1.3273152	1.5369158						
1.1103813	1.3883930	1.6155337						
1.1476298	1.4373810	1.6155337						
1.0945173	1.4541596							
1.0854260	1.3940761							
1.0728029	1.2938264							
0.9901329	1.3169102							
1.0160992	1.2702452							
0.9984386	1.2002246							
1.1819570	1.2422028							
1.0698780	1.3644659							
1.1138873	1.0070710							
1.0246193	0.7564680							
0.9058704	1.5694131							
1.0528904	1.6639129							
0.6960545	1.5195714							
1.0483368	1.5195714							
1.0146664	1.5195714							
0.8067417	1.5195714							
0.7304596	1.5195714							
0.9897098								
0.9814331								
0.9142270								
0.9610521								
0.9434373								
0.7064908								
0.9858553								
1.0775314								
0.9681205								
1.0090523								
1.5631047								
1.7817251								
1.2062187								
1.2982664								
2.3537706								
2.2350881								

## 60Hz Paquete 18.

Defecto 0	Defecto 1	Defecto 2	Defecto 3	Defecto 5	Defecto 6	Defecto 7	Defecto 8	Defecto 9
0.4268588	0.26112077	0.3146971	0.7076864	0.7854323	1.0566297	1.3286246	0.9042940	1.1739655
0.4633282	0.17877190	0.3638305	0.6298222	0.8261536	1.2999187	1.2634717	0.9033741	1.7005323
0.4012143	0.26697409	0.4187589	0.5307896	0.8322376	1.8237167	1.4204115	0.9735985	1.8647762
0.4091398	0.27821963	0.4432316	0.6743062	0.8214108	1.5748844	1.5275628	1.0340105	2.1557791
0.3677157	0.55471635	0.3732738	0.6796577	0.9262208	1.9180801	1.5129590	0.8867936	2.2241344
0.3720669	0.41849014	0.3595486	1.0985931	0.8352096	1.9261448	1.4478132	0.9011338	2.3865266
0.2391777	0.72374231	0.3868251	1.0202626	0.7649516	1.4766710	0.9184332	1.1651903	2.4084936
0.2287930	0.74808872	0.3085275	1.0271112	0.8794849	1.5818096	1.0594578	1.3181996	2.4626900
0.2616487	0.37457267	0.3713366	0.7210950	0.8686732	1.9007384	1.1261982	1.2990757	1.9695389
0.2590022	0.44033207	0.4101611	0.8353569	0.9271451	1.9809228	1.1299529	1.3474984	2.7259063
0.2317631	0.36665438	0.3623151	0.9559050	1.0890101	2.1502769	1.1076480	1.5535190	3.1741188
0.2190577	0.32475242	0.3731849	0.9928309	1.0088649	2.5348072	0.9995163	1.5346807	3.4235571
0.2275095	0.38953768	0.3043580	0.8617431	0.9543692	1.9988005	1.0183844	1.5104331	3.4572966
0.2468781	0.32903636	0.3290809	0.9045290	0.9153106	1.8769633	1.0076711	1.6984817	3.2251871
0.2745604	0.30404649	0.4220006	0.8820057	0.7620498	1.6988353	0.9423295	1.0968518	2.9827005
0.2719358	0.34159640	0.4319189	0.8016614	0.9090153	1.3691824	1.0231178	1.3081475	
0.3210515	0.27194887	0.4757187		1.0495516			1.4706557	
0.2734976	0.30457257	0.5250335						
0.3068207	0.26652452	0.4688924						
0.3160080	0.37327003	0.4582026						
0.3198885	0.39868931	0.5172632						
0.2984012	0.42156992	0.5172632						
0.2565728	0.43405424							
0.2750408	0.41810225							
0.3816476	0.35685255							
0.2778485	0.32365062							
0.3278857	0.38949032							
0.3247056	0.35657647							
0.3797341	0.33296545							
0.3558186	0.36450226							
0.3753451	0.35163569							
0.3873420	0.29054717							
0.3103712	0.68160347							
0.2934705	0.71250426							
0.2288630	0.56441018							
0.3706946	0.56441018							
0.2942912	0.56441018							
0.3198652	0.56441018							
0.2285228	0.56441018							
0.3177867								
0.2832795								
0.3339179								
0.3373942								
0.4439124								
0.2296137								
0.4073499								
0.4151131								
0.4675296								
0.4443266								
0.8639595								
1.0331223								
0.4977338								
0.5590468								
1.4349429								
1.4764028								

